

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DE L'EFFET DES PARAMÈTRES DE FABRICATION SUR LE
GAUCHISSEMENT DES ÉPROUVETTES MOULÉES PAR INJECTION

CHUNFANG ZHANG

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)

Avril 2007

© Chunfang Zhang, 2007.



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-29262-4

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-29262-4

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ÉTUDE DE L'EFFET DES PARAMÈTRES DE FABRICATION SUR LE
GAUCHISSEMENT DES ÉPROUVETTES MOULÉES PAR INJECTION

présenté par : ZHANG Chunfang

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. FISA Bohuslav, Ph.D., président

M. SANSCHAGRIN Bernard, D.Ing., membre et directeur de recherche

M. RUIZ Eduardo Antonio Julian, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je voudrais d'abord remercier Dieu de m'avoir donné la chance de venir au Canada et d'étudier à l'École Polytechnique de Montréal.

Je voudrais remercier le professeur Bernard Sanschagrin de m'avoir accepté comme étudiante. J'ai beaucoup appris de lui, non seulement les connaissances des polymères, mais également l'attitude pour étudier et pour être un humain. Je le remercie pour sa patience, sa direction et ses forts conseils dans le projet.

Aussi, je remercie les divers intervenants de l'École Polytechnique de Montréal qui m'ont aidée dans la réalisation de cette étude : Monsieur Jacques Beausoleil pour ses conseils pratiques sur le moulage par injection, Monsieur François Ménard pour son support avec la machine à mesurer tridimensionnelle et le professeur Marc Bourdeau pour son aide concernant Statistica.

Je remercie également mon collègue étudiant, Joël Pomerleau, pour son encouragement et ses conseils et Madame Josée Dugas pour la correction du français.

Finalement, merci à ma famille pour leur patience et leur appui.

RÉSUMÉ

Cette étude expérimentale a pour but de montrer l'effet des paramètres de fabrication sur le gauchissement des éprouvettes plastiques moulées par injection. Le moulage par injection est un processus avec lequel une résine à l'état fondu est injectée dans un moule fermé et formé dans le moule. Le gauchissement est la distorsion dimensionnelle des éprouvettes.

L'objet est une plaque de $114,3 \times 38,1 \times 3$ mm divisée en trois régions dans le sens de l'écoulement. Son épaisseur et sa configuration au centre peuvent être variées afin d'obtenir diverses géométries d'éprouvettes. Un système de mesure est exploré. C'est un bain de plâtre qui maintient les éprouvettes dans leur forme originale. L'appareil utilisé est une machine à mesurer tridimensionnelle. Il a été montré que ce système de mesure est suffisamment précis et exact pour étudier le gauchissement.

Le gauchissement est caractérisé par l'ondulation, la déformation, la flexion et la torsion. Le gauchissement dans la direction de l'écoulement et dans la direction transversale à l'écoulement et dans trois régions est comparé.

Le gauchissement des éprouvettes moulées en polypropylène est étudié sous deux aspects : l'effet de la résine et de la géométrie et l'effet des paramètres de fabrication tels que la température du moule, la pression de maintien et la vitesse d'injection.

L'effet de la résine et celui de la géométrie sur le gauchissement sont les plus significatifs. La résine la plus fluide induit moins de gauchissement. L'étranglement au centre de l'éprouvette induit davantage de gauchissement. Une géométrie asymétrique augmente la déformation et la flexion de la plaque. L'effet de la température du moule est significatif. Le gauchissement est décroissant en fonction de la température du

moule. L'effet de la pression de maintien et celui de la vitesse d'injection sont non linéaires.

En conclusion, la méthode de mesure du gauchissement développée permet de mesurer et de mieux comprendre l'effet des divers paramètres étudiés. De plus, l'étude a montré qu'il est possible de réduire le nombre de mesures d'un échantillon pour atteindre les mêmes conclusions.

ABSTRACT

This experimental study concerns the effect of the processing parameters on the warpage of the plastic specimens fabricated by injection molding. The injection molding is a process with which a resin in the molten state is injected into a closed mould. Warpage is the dimensional distortion of a specimen.

The specimen is a plate of $114,3 \times 38,1 \times 3$ mm which is divided into three regions in the flow direction. Its thickness and configuration at its center can be varied, in order to obtain various geometries of the specimens. A system of measurement is explored. It is a plaster bath which can maintain the specimens in their original form. The apparatus used is a machine with three-dimensional measurement. This measurement system is sufficiently precise and exact to measure warping of the specimens.

The warpage of two types of polypropylene is studied under two aspects. The first aspect is the effect of the resin and the geometry. The second is that of the processing parameters, the mold temperature, the hold pressure and the velocity of injection.

Warpage is presented in four ways: the deformation, the undulation, the flexion and the torsion of the specimens. The warpage in two directions in the three regions is compared.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES.....	VIII
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES FIGURES	XIV
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XVIII
LISTE DES ANNEXES	XX
1 INTRODUCTION.....	1
1.1 MATÉRIAUX POLYMÈRES.....	1
1.2 MOULAGE PAR INJECTION.....	2
1.3 QUALITÉ DE PRODUITS.....	4
1.4 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE.....	6
2 THÉORIE.....	8
2.1 ANALYSE DES FACTEURS QUI PRODUISENT LE GAUCHISSEMENT.....	8
2.1.1 <i>Retrait et gauchissement au moulage</i>	10
2.1.2 <i>Retrait et gauchissement après moulage</i>	14
2.2 DESCRIPTION DU GAUCHISSEMENT.....	15
2.2.1 <i>Coordonnées des éprouvettes</i>	16
2.2.2 <i>Coordonnées des moules</i>	18
2.2.3 <i>Paramètres de gauchissement</i>	18
2.3 ÉVALUATION DU SYSTÈME DE MESURE.....	22
2.3.1 <i>Introduction</i>	22
2.3.2 <i>Présentation des résultats</i>	24
2.3.3 <i>Carte de contrôle des étendues</i>	25
2.3.4 <i>Carte de contrôle des moyennes</i>	26
2.3.5 <i>Répétabilité et reproductibilité du système de mesure</i>	27

2.3.6	<i>Synthèse des paramètres</i>	29
3	MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL	30
3.1	FABRICATION DES ÉPROUVETTES PAR INJECTION.....	30
3.1.1	<i>Presse à injection</i>	30
3.1.2	<i>Matériau utilisé</i>	30
3.1.3	<i>Moule et inserts utilisés</i>	31
3.2	PARAMÈTRES DE FABRICATION ET LEUR INFLUENCE SUR LE GAUCHISSEMENT DES ÉPROUVETTES	33
3.2.1	<i>Température du moule</i>	33
3.2.2	<i>Vitesse d'injection</i>	33
3.2.3	<i>Pression de maintien</i>	34
3.2.4	<i>Temps de maintien</i>	35
3.2.5	<i>Température de la résine</i>	35
3.2.6	<i>Position de la vis de plastification</i>	36
3.2.7	<i>Temps de refroidissement et plastification</i>	37
3.3	EFFET CONNU DES PARAMÈTRES DE FABRICATION.....	38
3.3.1	<i>Effet des paramètres de fabrication</i>	38
3.3.2	<i>Paramètres de fabrication utilisés</i>	40
3.4	PROCÉDURE DE MOULAGE	40
3.5	MESURE DES INSERTS	41
3.6	MESURE DES ÉPROUVETTES.....	46
3.7	PRÉSENTATION DES MESURES D'UNE ÉPROUVETTE.....	49
3.8	PRÉSENTATION DES CALCULS DU GAUCHISSEMENT D'UNE ÉPROUVETTE	50
4	ANALYSE DES RÉSULTATS	53
4.1	INFLUENCE DE LA GÉOMÉTRIE ET DE LA RÉSINE SUR LE GAUCHISSEMENT	53
4.1.1	<i>Déformation et angles de torsion d'éprouvette</i>	53
4.1.2	<i>Flexion de l'éprouvette</i>	56
4.1.3	<i>Analyse ANOVA</i>	59
4.1.4	<i>Synthèse des effets de la résine et de la géométrie</i>	60

4.2	INFLUENCE DES PARAMÈTRES DE FABRICATION SUR LE GAUCHISSEMENT DE L'ÉPROUVETTE	60
4.2.1	<i>Influence de la température du moule sur le gauchissement de l'éprouvette</i>	61
4.2.2	<i>Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur le gauchissement de l'éprouvette</i>	70
4.3	CORRÉLATIONS ENTRE LES PARAMÈTRES DU GAUCHISSEMENT	89
4.4	CONTRÔLE DE QUALITÉ	90
4.5	SYNTHÈSE DES EFFETS	90
4.5.1	<i>Régression</i>	90
4.5.2	<i>Analyse des résidus</i>	93
5	CONCLUSION	95
	RÉFÉRENCES	97
	ANNEXES	101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 - Méthodes d'étude du retrait, du gauchissement ou du changement d'épaisseur	7
Tableau 2.1 - Définitions des paramètres analysés. Z' est la valeur correspondant à la référence transformée, laquelle est définie par les points extrêmes d'une ligne ou d'une colonne	19
Tableau 2.2 - Déformation, flexions maximales et angles de torsion dans le sens transversal à l'écoulement	23
Tableau 2.3 - Flexions maximales et angles de torsion dans le sens parallèle à l'écoulement	24
Tableau 2.4 - Combinaison de la répétabilité et de la reproductibilité du système de mesure	28
Tableau 3.1 - Fiche technique du matériel utilisé.....	31
Tableau 3.2 - Effet de certains paramètres de fabrication sur le retrait, le gauchissement ou le changement d'épaisseur, √ indique que l'auteur attribue l'effet significatif du paramètre sur le sujet.....	39
Tableau 3.3 - Paramètres étudiés et leurs combinaisons pour chaque résine et chaque géométrie	40
Tableau 3.4 - Positions de la vis, dosage et pression maximale d'injection	42
Tableau 3.5 - Corrélation entre les positions de la vis, condition de fabrication, dosage et pression maximale d'injection.....	43
Tableau 4.1 - Valeurs moyennes et écart-types des déformations et des angles de torsion	54
Tableau 4.2 - Valeurs moyennes et écart-types des flexions.....	57
Tableau 4.3 - Effet de la résine et de la configuration géométrique sur le gauchissement	59
Tableau 4.4 - Effet de la résine et de la géométrie sur chaque paramètre du gauchissement	60

Tableau 4.5 - Valeurs moyennes et écart-type de la déformation et des angles de torsion	62
Tableau 4.6 - Valeurs moyennes et écart-types des flexions, résine HIVAL 2420NA..	64
Tableau 4.7 - Valeurs moyennes et écart-types des déformations et des angles de torsion, résine Pro-fax SG899	66
Tableau 4.8 - Valeur moyennes et écart-types des flexions, résine Pro-fax SG899	67
Tableau 4.9 - Analyse de la variance pour tous les paramètres du gauchissement pour la résine HIVAL 2420NA	69
Tableau 4.10 - Analyse de la variance pour tous les paramètres du gauchissement pour la résine Pro-fax SG899	69
Tableau 4.11 - Valeurs moyennes des déformations pour la résine HIVAL 2420NA...	72
Tableau 4.12 - Analyse ANOVA de l'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la déformation des éprouvettes, géométrie 1 : épaisseur constante.....	73
Tableau 4.13 - Analyse ANOVA de l'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la déformation des éprouvettes, géométrie 2 : épaisseur variable et géométrie symétrique	74
Tableau 4.14 - Analyse ANOVA de l'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la déformation des éprouvettes, géométrie 3 : épaisseur variable et géométrie asymétrique.....	74
Tableau 4.15 - Effets de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la torsion et la flexion pour la résine HIVAL 2420NA. //: dans le sens de l'écoulement, +: dans le sens transversal, √: effet significatif, x : effet non significatif.....	80
Tableau 4.16 - Valeurs moyennes des déformations pour la résine Pro-fax SG899	82
Tableau 4.17 - Analyse ANOVA des valeurs des déformations pour la résine Pro-fax SG899, géométrie 1 : épaisseur constante.....	82
Tableau 4.18 - Analyse ANOVA des valeurs des déformations pour la résine Pro-fax SG899, géométrie 2 : épaisseur variable et géométrie symétrique	83
Tableau 4.19 - Valeurs moyennes des torsions de la résine Pro-fax SG899	85

Tableau 4.20 - Valeurs moyennes des flexions, résine Pro-fax SG899	87
Tableau 4.21 - Effets de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la torsion et la flexion pour la résine Pro-fax SG899. //: dans le sens de l'écoulement, +: dans le sens transversal, √ : effet significatif, x : effet non significatif.....	88
Tableau 4.22 - Conditions qui produisent moins de gauchissement	89
Tableau 4.23 - Paramètres non corrélés - les éléments essentiels	90
Tableau 4.24 - Synthèse des effets	91

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 - Schéma d'une presse à injection et ses principales composantes (Pomerleau Joël, 2004).	3
Figure 2.1 - Vue générale de la déformation d'une éprouvette moulée.	8
Figure 2.2 - Schéma des causes qui produisent le retrait d'éprouvette moulée par injection.	9
Figure 2.3 - Diagramme PVT d'une résine semi-cristalline (Fischer, 2003).	11
Figure 2.4 - Étapes de l'injection.	12
Figure 2.5 - Diagramme PVT d'une résine durant l'injection.....	12
Figure 2.6 - Évolution de la pression durant l'injection.	13
Figure 2.7 - Plan de référence (rectangle gris) et le point origine "O" d'une éprouvette.	15
Figure 2.8 - Positions des trois lignes et des trois colonnes.	16
Figure 2.9 - Angles de torsion et flexion dans le sens transversal (les lignes montrent les distorsions perpendiculaires à l'écoulement).	19
Figure 2.10 - Angles de torsion et flexion dans le sens de l'écoulement (les colonnes montrent les distorsions parallèles à l'écoulement).....	20
Figure 2.11 - Représentation des colonnes et des lignes d'une éprouvette.	23
Figure 2.12 - Déformation des éprouvettes.	25
Figure 2.13 - Graphique statistique de la carte d'étendue des déformations.....	26
Figure 2.14 - Graphique statistique de la carte des moyennes de déformation par opérateur.	27
Figure 2.15 - Répétabilité et reproductibilité combinées du système de mesure, 2 opérateurs, chacun fait 3 mesures sur 3 éprouvettes.	28
Figure 3.1 - Géométries des éprouvettes. (1) épaisseur constante, (2) épaisseur variable et géométrie symétrique, (3) épaisseur variable et géométrie asymétrique.....	31
Figure 3.2 - (1) cavité avec un seuil en film; (2) cavité avec un seuil latéral.....	32
Figure 3.3- Position de la vis lors du remplissage.	36

Figure 3.4 - Insert du moule de la partie mobile.	44
Figure 3.5 - Mesures répétées de chaque insert, (1) épaisseur constante; (2) épaisseur variable et géométrie symétrique; (3) épaisseur variable et géométrie asymétrique.	45
Figure 3.6 - Éprouvettes mises sur une surface plate après avoir été moulées.	46
Figure 3.7 - Vue d'une éprouvette et les trois tiges.	48
Figure 3.8 - 75 points sur la surface d'une éprouvette.	48
Figure 3.9 - Système de mesure MMT.	49
Figure 3.10 - Surface d'une éprouvette : résine HIVAL 2420NA, épaisseur variable et géométrie symétrique, $T_m = 50^{\circ}\text{C}$, $P_m = 30 \text{ MPa}$, $V_{inj} = 60 \text{ mm/s}$, ...	50
Figure 3.11 - Vue générale de la déformation et de l'ondulation.	51
Figure 3.12 - Torsion et flexion dans le sens transversal.	51
Figure 3.13 - Torsion et flexion dans le sens de l'écoulement.	52
Figure 4.1 - Effets de la résine et de la géométrie sur la déformation totale et les angles de torsion dans les deux sens.	53
Figure 4.2 - Effets de la résine et de la géométrie sur la flexion dans les deux sens.	57
Figure 4.3 - Influence de la température du moule sur la déformation et la torsion des éprouvettes.	61
Figure 4.4 - Influence de la température du moule sur la flexion de l'éprouvette, résine HIVAL 2420NA.	63
Figure 4.5 - Influence de la température sur la déformation et la torsion de l'éprouvette, résine Pro-fax SG899.	65
Figure 4.6 - Influence de la température sur la flexion de l'éprouvette, résine Pro-fax SG899.	67
Figure 4.7 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la déformation des éprouvettes : 1 épaisseur constante; 2 épaisseur variable et géométrie symétrique; 3 épaisseur variable et géométrie asymétrique, résine HIVAL 2420NA, à 50°C	71

Figure 4.8 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la torsion de l'éprouvette, géométrie 1 : épaisseur constante,.....	75
Figure 4.9 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la distorsion de l'éprouvette, géométrie 2 : épaisseur variable et géométrie symétrique, résine HIVAL 2420NA, à 50°C.....	76
Figure 4.10 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la distorsion de l'éprouvette, géométrie 3 : épaisseur variable et géométrie asymétrique, résine HIVAL 2420NA, à 50°C.....	76
Figure 4.11 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la flexion de l'éprouvette, épaisseur constante (géométrie 1), ...	78
Figure 4.12 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la flexion de l'éprouvette, épaisseur variable et géométrie symétrique (géométrie 2), résine HIVAL 2420NA, à 50°C.....	79
Figure 4.13 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la flexion de l'éprouvette, épaisseur variable et géométrie asymétrique (géométrie 3), résine HIVAL 2420NA, à 50°C.....	79
Figure 4.14 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la déformation totale des éprouvettes : géométrie 1 épaisseur constante; géométrie 2 épaisseur variable et géométrie symétrique, résine 2 : Pro-fax SG899, à 50°C....	81
Figure 4.15 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la torsion des éprouvettes, épaisseur constante (géométrie 1), résine 2 :Pro-fax SG899, à 50 °C.	83
Figure 4.16 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la torsion des éprouvettes, épaisseur variable et géométrie symétrique (géométrie 2), résine 2 : Pro-fax SG899, à 50°C.....	84
Figure 4.17 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la flexion de l'éprouvette, épaisseur constante (géométrie 1), résine 2 :Pro-fax SG899, à 50°C.	86

Figure 4.18 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la flexion de l'éprouvette, épaisseur variable et géométrie symétrique (géométrie 2), résine 2 :Pro-fax SG899, à 50°C.....	87
Figure 4.19 - Droite de Henry des résidus du modèle pour la Torsion I.....	93
Figure 4.20 - Droite de Henry des résidus du modèle pour la Flexion Q.....	94
Figure 4.21 - Droite de Henry des résidus du modèle pour la Flexion 3.	94

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ABS	Amorphe polymère Acrylonitrile-Butadiène-Styrène
ASTM	American Society for Testing of Materials
BPANN	Back-propagation artificial neural networks
CREPEC	Centre de Recherche En Plasturgie et Composites
G	Gauchissement
Géo	Géométrie d'éprouvette
HDPE	High Density Polyethylene
LCP	Semi-cristalline, Poly(benzoate-naphtoate)
LDPE	Low Density Polyethylene
LLDPE	Linear Low Density Polyethylene
MI / MFI	Melt Index / Melt Flow Index
MMT	Machine à Mesurer Tridimensionnelle
OCMM	Optical coordinate measuring machine, avec l'exactitude vers le bas à 2.5 microns
PA66	Polyamide 66
P-V-T	Pression - volume spécifique - Température
PC/ABS	Alliage de Polycarbonate (PC) et acrylonitrile butadiène styrène (ABS)
PEI	Amorphe polymère, Poly(etherimide)
Pinjmax	Pression d'injection maximale
Pm	Pression de maintien
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle
POM	Polyacetal C9021, plastique semi-cristallin de technologie
PP	Semi-cristalline Polypropylène
PS	Amorphe polymère Polystyrène
PVC	Poly(vinyl chloride)
R	Retrait

R & G	Retrait et gauchissement
S1	Position de la vis au début d'injection, indique que la vitesse d'injection V1 commence
S2	Position de la vis, indique que la vitesse d'injection V2 commence
S3	Position de la vis, indique que le temps de maintien commence
S4	Position de la vis, indique un coussin de la résine entre la buse et la vis à la fin du remplissage
S5	Position de la vis à la fin de pression de maintien
Sv1	Distance entre S1 et S2, vitesse de la vis est de V1
Sv2	Distance entre S2 et S3, vitesse de la vie est de V2
Spm	Distance entre S3 et S4, phase de la pression de maintien
Tm	Température du moule
Tr	Température de la résine
trf	Temps de refroidissement
tm	Temps de maintien
V1	Premier palier de vitesse d'injection
V2	Deuxième palier de vitesse d'injection
Vinj	Vitesse d'injection

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 - ANALYSE DE LA RÉPÉTABILITÉ ET DE LA REPRODUCTIBILITÉ DU SYSTÈME DE MESURE.....	101
ANNEXE 2 - CORRÉLATIONS ENTRE LES PARAMÈTRES DU GAUCHISSEMENT	102
ANNEXE 3 - VALEURS DES PARAMÈTRES DE GAUCHISSEMENT POUR LA RÉSINE HIVAL 2420NA.....	103
ANNEXE 4 - EFFETS DE LA GÉOMÉTRIE ET DE LA TEMPÉRATURE DU MOULE SUR LE GAUCHISSEMENT	106
ANNEXE 5 - EFFETS DE LA PRESSION DE MAINTIEN ET DE LA VITESSE D'INJECTION SUR LE GAUCHISSEMENT	107
ANNEXE 6 - CONTRÔLE DE QUALITÉ	110

1 INTRODUCTION

De nos jours, les plastiques sont de plus en plus utilisées. Ce sont des matériaux synthétiques et modernes. Grâce à leurs propriétés telles que la légèreté et la durabilité, ils sont beaucoup appliqués dans les domaines de l'industrie alimentaire, électrique et automobile, de l'utilité médicale et de la construction.

Au Canada, l'industrie des plastiques a connu un taux de croissance cinq fois plus grand que l'ensemble du secteur manufacturier depuis 1961 et cette tendance devrait se poursuivre dans l'avenir (**Association canadienne de l'industrie des plastiques, 2006**). Cette croissance est due à leur efficacité énergétique et aux propriétés des plastiques. Ils ont besoin de moins d'énergie pour leur fabrication que les autres matériaux.

1.1 Matériaux polymères

Les matériaux polymères sont divisés en trois catégories : thermoplastiques, thermodurcissables et élastomères.

Les polymères thermodurcissables, comme leur nom l'indique, polymérisent lorsqu'on augmente leur température et développent leurs propriétés mécaniques. Ils peuvent être mis en forme qu'une seule fois et deviennent infusibles et insolubles après polymérisation. Les réactions chimiques ont lieu au cours du traitement des résines thermodurcissables.

Les élastomères sont capables d'être déformés davantage que les autres matériaux polymères et leur déformation est élastique parce que leur température de transition vitreuse est toujours inférieure à la température ambiante.

Les polymères thermoplastiques ne possèdent pas de liaisons chimiques entre leurs chaînes. Les chaînes sont liées par des liaisons de Van der Waals. Ces liaisons peuvent être rompues sous l'action de la chaleur. Les thermoplastiques se ramollissent avec le chauffage et durcissent lors du refroidissement sans modification de leur structure. Parmi les thermoplastiques, il y a deux classes de polymères : amorphes et semi-cristallins. Les thermoplastiques amorphes ont des molécules enchevêtrées aléatoirement. Cette structure moléculaire les rend incapables de cristalliser. Leurs propriétés sont plutôt isotropes. Dans le cas des thermoplastiques semi-cristallins, les chaînes moléculaires s'alignent dans certaines régions avec un certain niveau.

Parmi les processus de fabrication des thermoplastiques, on note : l'extrusion, l'extrusion gonflage, l'extrusion soufflage, le moulage par injection, etc., dont le moulage par injection est le plus connu. En masse, 32 % de tous les plastiques sont traités par le moulage par injection (**Injection Molding Resource Organisation, 2006**).

1.2 Moulage par injection

Le moulage par injection est un processus de fabrication approprié pour tous les thermoplastiques. Dans ce processus, une matière plastique est mise en forme par injection sous pression à partir d'un cylindre chauffé en passant au travers d'une buse, de canaux d'alimentation et d'un seuil dans la cavité d'un moule fermé. La Figure 1.1 montre une presse à injection et ses principales composantes (**Pomerleau Joël, 2004**). Une presse comprend deux parties essentielles qui travaillent ensemble. Ce sont l'unité de fermeture/outillage et l'unité de plastification/injection. L'unité de fermeture maintient le moule fermé lors du remplissage de la résine et éjecte l'éprouvette moulée à la fin du cycle de moulage. L'unité d'injection ressemble à une extrudeuse. Les granules de polymère (résine) sont mises dans la trémie.

Le processus de fonctionnement d'une presse à injection consiste en cinq étapes :

- 1) Plastification et dosage de la résine : quand un cycle commence, les granules entrent dans le fourreau chauffé où il y a une vis. La vis tourne et pousse les granules vers la buse. En même temps, les granules subissent une force de cisaillement et de frottement. Cette force produit une chaleur. La chaleur et le chauffage du fourreau font fondre les granules à l'état liquide. À la fin de cette étape, une quantité de résine liquide est accumulée entre la vis et la buse.

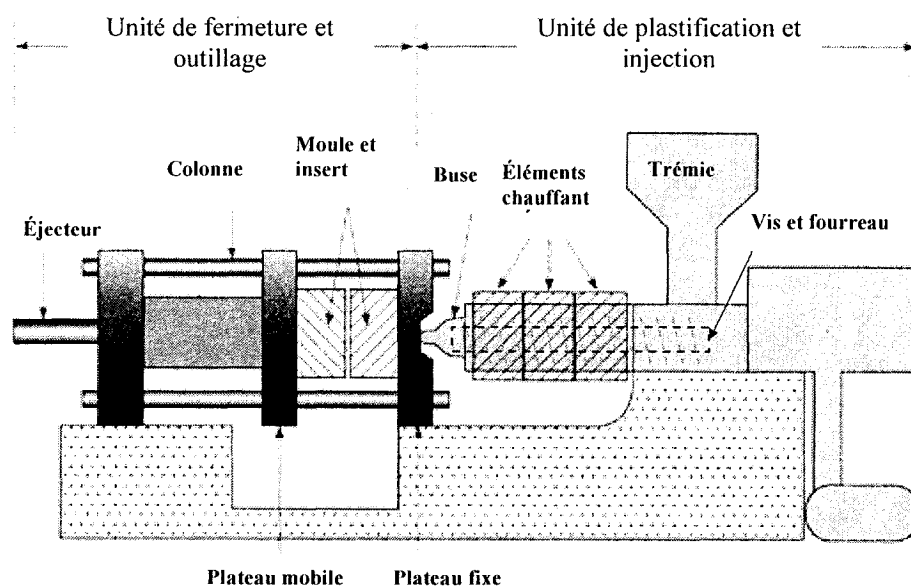


Figure 1.1 - Schéma d'une presse à injection et ses principales composantes (Pomerleau Joël, 2004).

- 2) Fermeture et verrouillage du moule : le système de fermeture fait fermer et verrouiller le moule avec une force spécifique. Cette force est plus grande que la force générée dans la cavité lors du remplissage de la cavité du moule.
- 3) Injection : le moule reste fermé et la vis avance avec une vitesse désignée et pousse la résine fondue dans la cavité du moule. Pendant ce temps, la vis ne tourne pas.

- 4) Maintien en pression et refroidissement : durant le temps de maintien, le système applique une certaine pression à la résine et ajoute de la résine dans la cavité afin de compenser le besoin de matière dans la cavité causée par le changement de volume de la résine. À la fin du maintien, le seuil est figé. La vis recule et refait la plastification et dosage de la résine pour le prochain cycle. Durant le temps de refroidissement, l'éprouvette se refroidit dans la cavité.
- 5) Ouverture du moule et éjection de l'éprouvette : à la fin du refroidissement, l'éprouvette est solidifiée et peut être éjectée. Le moule est ouvert et l'éprouvette est sortie de la cavité par les éjecteurs.

1.3 Qualité de produits

La qualité du moulage d'une pièce comprend trois volets (**Pomerleau Joël, 2004**) : les dimensions et la forme de la pièce, l'apparence et les propriétés mécaniques. Plus précisément, ce sont : retrait et gauchissement, bavures, manque de matière, ligne de soudure, jet de matière, marque de brûlure, contrainte (**Edward A. & Muccio, 1991**). La qualité du moulage dépend beaucoup du matériau, du design et de la compétence de l'opérateur. Les défauts, comme le jetting et les marques de brûlure, peuvent être enlevés. Cependant, le retrait et le gauchissement existent toujours, plus ou moins, dans les éprouvettes moulées par injection. Cela est déterminé par le changement du volume spécifique avec la température et la pression (section 2.1.1). Pour les semi-cristallins, ce phénomène est plus important. Le retrait et le gauchissement sont principalement provoqués par les contraintes résiduelles dans une éprouvette (**Ni, 2002**).

Le retrait d'un semi-cristallin (Polypropylène) est étudié par les chercheurs et un retrait anisotrope est observé (**Pomerleau & Sanschagrin, 2006**). Un retrait non uniforme rend plus sérieux le gauchissement. Le gauchissement est plus ennuyeux que le retrait (**Menges & Mohren, 1986**). Il comprend la déformation, la flexion, l'ondulation et la distorsion d'une éprouvette.

Le gauchissement a une forte connexion avec le retrait et le changement d'épaisseur. Ces sujets sont beaucoup étudiés par les chercheurs. Les études, leurs méthodes d'analyse et de mesure sont montrées au Tableau 1.1. Leurs méthodes utilisées comprennent deux volets : méthode théorique pure ou méthode expérimentale. La méthode théorique pure, à l'aide du logiciel permanent, sert à comprendre comment les paramètres de fabrication influencent le retrait, le gauchissement ou le changement d'épaisseur, qui inclut la prédiction et la simulation. Liao et al. affirment que la méthode BPANN est une façon efficace pour prédire le retrait ou le gauchissement (Liao et al., 2004).

La méthode expérimentale consiste à analyser, à partir des données des essais, les effets des paramètres de fabrication sur le retrait, le gauchissement ou le changement d'épaisseur. Dans les études du Tableau 1.1, les auteurs n'expliquent pas comment les données sont obtenues. Ils expliquent rarement comment leurs éprouvettes sont fixées pour mesurer et où sont le plan de référence et le point d'origine des mesures. Tang et al. utilisent le plan du marbre comme plan de référence, mais la déformation de la surface de l'éprouvette qui est en contact avec le plan n'est pas considérée (Tang et al., 2007).

Dans leurs études, le gauchissement est souvent étudié par comparaison des coordonnées dans la direction Z de deux points à la surface des éprouvettes. Leurs coordonnées du moule ne sont pas considérées. Dans cette étude, un système de mesure est employé pour ne pas donner de déformation supplémentaire et les coordonnées du moule sont aussi considérées. On voit dans le Tableau 1.1 que les statistiques sont beaucoup employées pour les essais expérimentaux.

1.4 Objectifs de l'étude

Le moulage par injection de polymères semi-cristallins induit généralement des retraits importants et non uniformes de l'éprouvette moulée. Selon le type de résine, la géométrie d'éprouvette et les valeurs des paramètres de mise en forme, le retrait génère plus ou moins de gauchissement dans les éprouvettes. Il serait donc intéressant de définir un modèle permettant de déterminer le gauchissement en chaque point de l'éprouvette en fonction du type de résine, de la géométrie de l'éprouvette et des paramètres de fabrication dans le but de pouvoir ensuite trouver les valeurs de ces derniers permettant de la minimiser.

Les objectifs de cette étude sont de définir le gauchissement des éprouvettes plastiques moulées par injection, de mettre au point une méthode de mesure du gauchissement des éprouvettes, de trouver une méthode de présentation des résultats des mesures du gauchissement et d'établir la relation entre le gauchissement et le type de résine, la géométrie d'éprouvette et les conditions de fabrication à partir de données expérimentales. Uniquement l'influence de la température du moule, de la vitesse d'injection et de la pression de maintien est étudiée.

Il faut mentionner que, dans cette étude, la déformation du moule lors du remplissage, la rugosité de la surface des éprouvettes et le changement d'épaisseur des éprouvettes sur le gauchissement sont négligés afin de simplifier l'analyse.

Tableau 1.1 - Méthodes d'étude du retrait, du gauchissement ou du changement d'épaisseur

Auteur	Sujet	Géométrie de l'éprouvette	Résine	Méthode d'analyse	Méthode de mesure
(Denizart, Vincent et al. 1995)	G	Disque	PS et PP	Éléments finis	Tridimensionnel sans contact
(Kurtaran, Ozcelik et al. 2005)	G	Base de lampe de plafond d'autobus	ABS (GE)	1) Éléments finis MoldFlow 2) Réseau neural artificiel (Statistique) 3) Algorithme génétique	MMT
(Huang & Tai 2001)	G	Forme de boîte	PC/ABS	Simulation C-MOLD	
(Jansen, Van Dijk et al. 1998)	R	Plaque	Amorphe et semi-cristalline	Prédiction	Microscope
(Kwak, Suzuki et al. 2005)	Réduction d'épaisseur	Objet optique	PMMA	Simulation et prédiction	
(Kennedy Peter (1) & Zheng Rong(2))	R et G prédiction	Plaque	PP	Prédiction	
(Kramschuster, Cavitt, et al. 2005)	R & G	Forme de boîte	PP7032E2	Statistique	Appareil de mesure de la coordonnée optique
(Leo & Cuvelliez 1996)	Changement d'épaisseur	Plaque	HDPE	Description	Micromètre
(Liao, Hsieh, et al. 2004)	R&G prédiction méthode	Couverture d'un téléphone cellulaire	PC/ABS	1) BPANN 2) Taguchi (Statistique)	1) Cyclone Scanner 2) PolyCAD 3) PolyWorks
(Liu & Manzione 1996)	Épaisseur	Forme de boîte	PEI LCP/GM	Statistique	MMT
(Ni 2002)	R&G	Magasin d'un imprimeur	ABS	Simulation	
(Pomerleau & Sanschagrin 2006)	R	Plaque	PP	Statistique	Profilographe
(Postawa & Koszkuł 2005)	R	Plaque	POM PS	Statistique	Capteur jauge
(Régner G. & Trotignon J.P. 1993)	R	Plaque	PA66	Statistique	Microscope

2 THÉORIE

2.1 Analyse des facteurs qui produisent le gauchissement

Selon le dictionnaire TERMIUM (TERMIUM Plus, 2006), le gauchissement est la distorsion dimensionnelle d'un objet en plastique après moulage ou une autre opération. La Figure 2.1 montre le gauchissement d'une éprouvette moulée par injection.

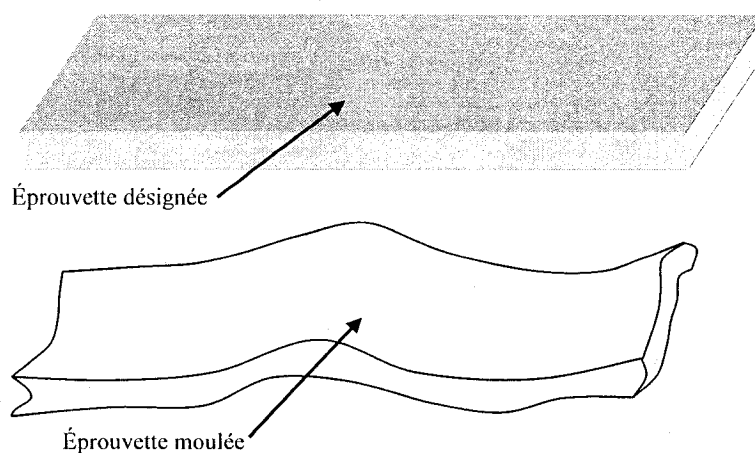


Figure 2.1 - Vue générale de la déformation d'une éprouvette moulée.

Le gauchissement est causé par le retrait non uniforme et les contraintes résiduelles. En général, le retrait est la différence dimensionnelle entre une éprouvette moulée et sa matrice. Il est affecté par plusieurs facteurs. Ces facteurs peuvent être classifiés en cinq catégories, soit le design d'éprouvette, la conception du moule, le matériel utilisé, les paramètres de mise en forme et le traitement après moulage. Chaque catégorie possède plusieurs facteurs qui peuvent influencer les résultats de cette catégorie. En plus, tous les facteurs des cinq catégories se combinent et jouent un rôle sur le retrait de l'éprouvette moulée par injection. La Figure 2.2 montre schématiquement ces cinq catégories et les facteurs définis à l'aide du logiciel STATISTICA (Statistica version 7.0).

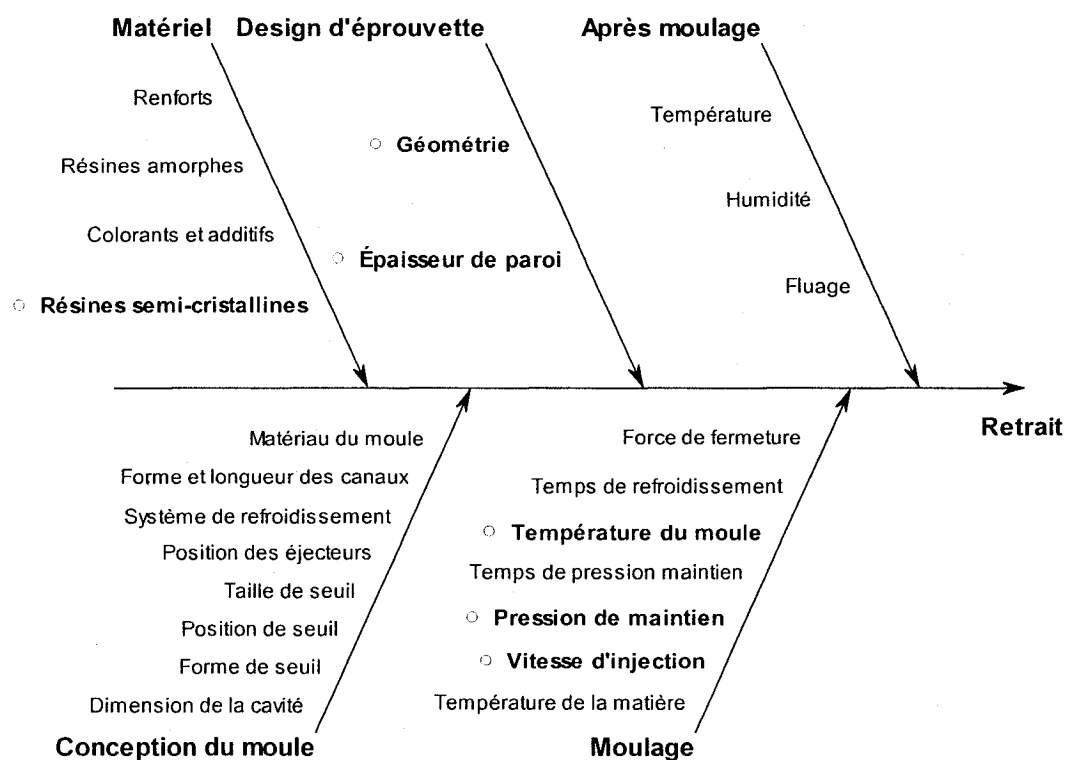


Figure 2.2 - Schéma des causes qui produisent le retrait d'éprouvette moulée par injection.

Les moules ainsi que les inserts ont été conçus et fabriqués par Monsieur Joël Pomerleau (**Pomerleau Joël, 2004**), les facteurs dans la catégorie « conception du moule » restent constants.

Dans la catégorie « après moulage », les éprouvettes sont mises dans un même endroit et déposées d'une manière identique pour que toutes les éprouvettes soient traitées de la même façon après moulage. Il n'y a donc pas de variation de facteurs dans cette catégorie.

Dans la catégorie « matériel », pour simplifier l'analyse, aucun renfort ou colorant n'est inclus dans la matière. Étant donné que la résine amorphe est une résine isotrope, les éprouvettes moulées avec cette résine ont des propriétés isotropes en général au niveau mécanique. Donc, elles subissent un retrait plus uniforme et apparaissent moins gauchies. Deux résines semi-cristallines seront étudiées, soit le polypropylène HIVAL 2420NA et le polypropylène Pro-fax SG899. Ce sont des grades pour le moulage par injection.

Dans la catégorie « design d'éprouvette », il est possible de varier la géométrie et l'épaisseur des éprouvettes. La géométrie possède une épaisseur constante aux deux extrémités avec une région centrale variable en épaisseur et en configuration. Trois géométries sont choisies, la première ayant une épaisseur constante dans les trois régions, la seconde une épaisseur plus faible au centre mais une forme symétrique et, enfin, la troisième ayant une géométrie asymétrique. Le tout sera détaillé dans le chapitre méthodologie du mémoire.

Dans la catégorie « moulage », tous les facteurs jouent un rôle important dans la fabrication et influencent le retrait et le gauchissement. Néanmoins, trois facteurs seront choisis comme variables pour cette étude, soit la température du moule, la pression de maintien et la vitesse d'injection.

Tous les facteurs qui seront variés dans cette étude sont marqués du symbole 'o' dans le schéma de la Figure 2.2. Le gauchissement causé par la variation de ces facteurs sera analysé au chapitre quatre.

2.1.1 Retrait et gauchissement au moulage

Le retrait est causé principalement par le changement du volume spécifique de la résine. La Figure 2.3 montre un diagramme PVT d'une résine semi-cristalline où le volume

spécifique varie en fonction de la pression et de la température. On y constate la dépendance des températures de transition vitreuse (T_g) et de fusion (T_m) en fonction de la pression (**Fischer, 2003**). Généralement, le volume spécifique d'un polymère augmente avec sa température, mais diminue avec l'augmentation de la pression. Cette variation est causée par des changements morphologiques et le changement du volume libre. Si la masse d'une éprouvette est constante, son volume augmente avec son volume spécifique.

Les Figures 2.4 et 2.5 montrent les phases du remplissage de la cavité du moule : (1) et A, avant le remplissage; (2) et A à B, pour le remplissage; (3) et B à C, pour le compactage durant la phase de maintien; (4) et C à D, lors du refroidissement et (5) et D à E, après éjection de la pièce. La dimension de l'éprouvette est plus petite que celle de la cavité à cause du phénomène de retrait (**Fischer, 2003**).

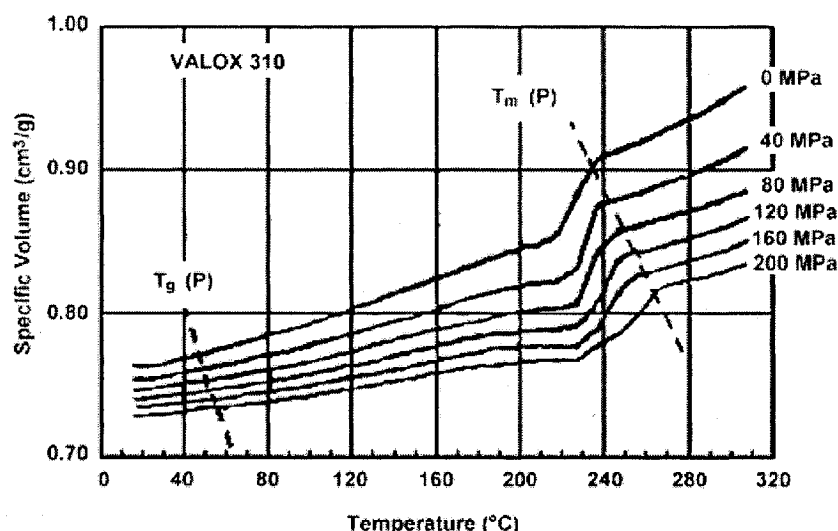


Figure 2.3 - Diagramme PVT d'une résine semi-cristalline (**Fischer, 2003**).

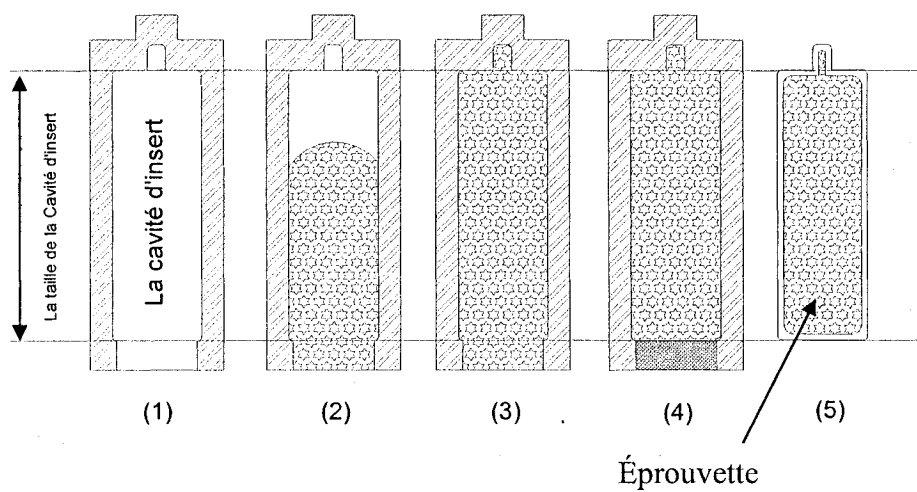


Figure 2.4 - Étapes de l'injection.

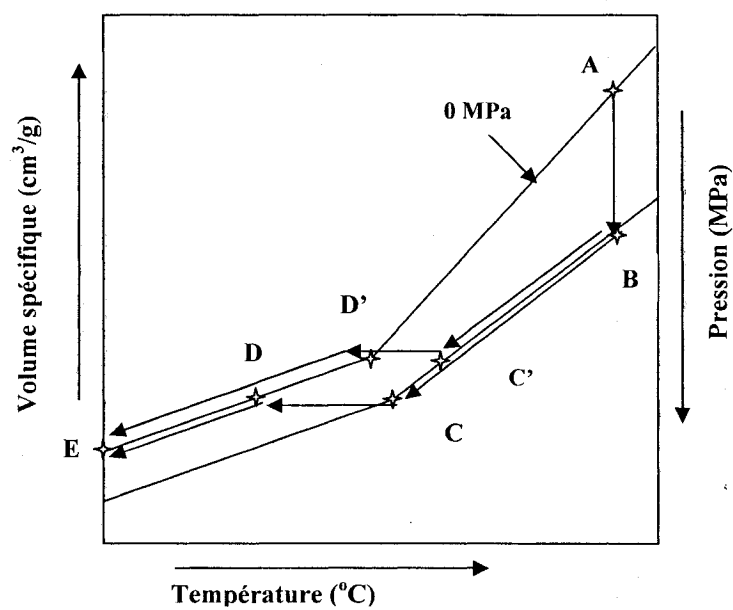


Figure 2.5 - Diagramme PVT d'une résine durant l'injection.

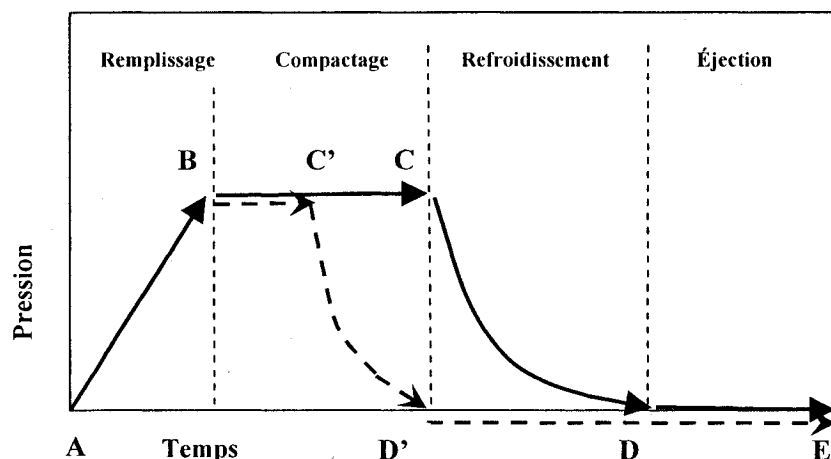


Figure 2.6 - Évolution de la pression durant l'injection.

Durant le moulage par injection, la température et la pression de la résine varient en fonction du temps. Les Figures 2.5 et 2.6 montrent l'évolution lors du remplissage.

- A : Début de l'injection. La résine est à l'état fondu et à la pression atmosphérique.
- A à B : Remplissage. La vis d'injection avance et exerce une pression sur la résine. La résine est injectée dans la cavité du moule. La pression augmente au fur et à mesure que la résine remplit la cavité.
- B : Fin du remplissage. La cavité du moule est remplie et la pression atteint sa valeur maximale. Une certaine masse de résine est injectée dans la cavité du moule.
- B à C : Compactage de la résine lors de la pression de maintien. La pression est maintenue constante. La température diminue avec le temps.
- C : Fin de la phase de compactage. Le seuil est figé. La résine ne peut plus entrer dans la cavité. La valeur de la pression est toujours réglée à la pression de maintien.

- C à D : Phase de refroidissement. La résine ne peut entrer dans la cavité. La température diminue avec le temps jusqu'à l'ouverture du moule. La pression dans la cavité diminue jusqu'à zéro.
- D : Fin du refroidissement. La pression dans la cavité est zéro. La température de démoulage est atteinte.
- E : Fin de l'injection. L'éprouvette est éjectée. La température de l'éprouvette est différente de la température ambiante.

À la fin du compactage, au point C, l'éprouvette possède une certaine masse. Après ce point, plus aucune matière n'entre dans la cavité. La valeur du volume spécifique au point C est plus élevée que celle au point E. La différence entre ces deux valeurs est le changement du volume spécifique au moulage. La masse multipliée par la modification du volume spécifique indique le retrait volumétrique de l'éprouvette au moulage. Ce changement est positif et s'explique par les changements dimensionnels dans trois directions (x, y et z). Les retraits sont positifs ou négatifs dans chacune des directions. Pour les résines semi-cristallines, les retraits dans les trois directions ne sont pas linéaires. Les retraits dans une éprouvette sont donc différents d'une partie à l'autre de la géométrie, d'une direction à l'autre. Ce phénomène cause donc un retrait non uniforme qui engendre un gauchissement de l'éprouvette.

2.1.2 Retrait et gauchissement après moulage

Après moulage, le volume spécifique de l'éprouvette continue à diminuer avec le temps, surtout dans les premiers quarante-huit heures. Cet événement est causé par la cristallisation, la relaxation des chaînes et la modification du volume libre de la résine dans l'éprouvette. Donc, son volume diminue parce que sa masse est constante. Pour les éprouvettes moulées avec la résine PVC, leur volume augmente parce que le PVC absorbe de l'eau en milieu ambiant. Dans cette étude, la résine utilisée est du polypropylène qui est un polymère semi-cristallin, donc son volume diminue à cause du changement d'état physique après moulage. Aussi, ce changement de volume s'explique

par des variations dimensionnelles de l'éprouvette, c'est le retrait dans les trois directions.

De plus, les distributions de la pression et de la température ne sont pas uniformes dans la cavité lors du remplissage et dans l'éprouvette après moulage, les distributions de volume spécifique ne sont également pas uniformes dans l'éprouvette moulée. Donc, les distributions de retrait ne sont pas uniformes. Ainsi, l'éprouvette gauchit.

2.2 Description du gauchissement

La surface de l'éprouvette correspondant à la partie mobile du moule est mesurée avec une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT). Les résultats sont enregistrés. Ce sont les coordonnées des points représentant les soixante-quinze entités. Ces coordonnées servent à la construction de la surface de l'éprouvette. La surface est plus ou moins égale. La Figure 2.7 présente schématiquement la surface d'une éprouvette, le point d'origine et le plan de référence.

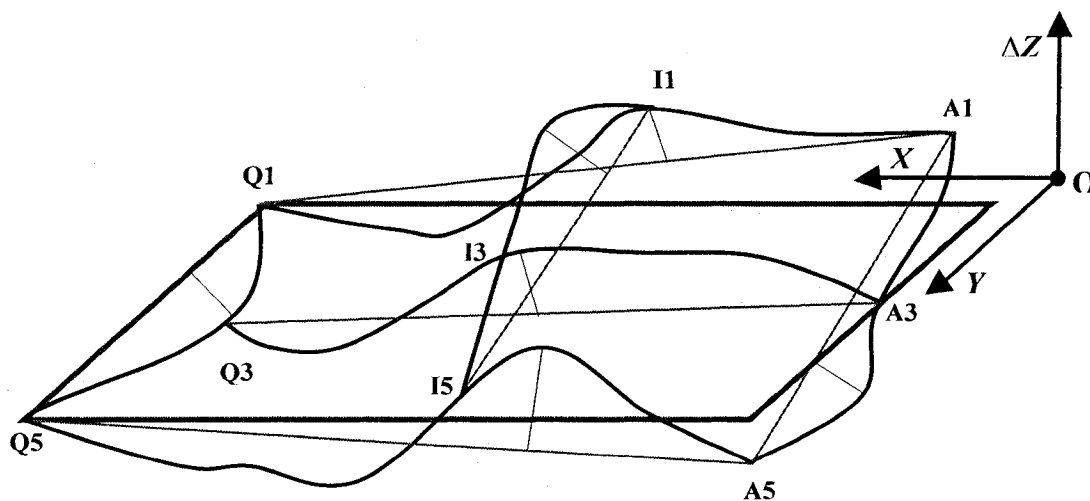


Figure 2.7 - Plan de référence (rectangle gris) et le point origine "O" d'une éprouvette.

Dans cette figure, la surface de l'éprouvette est construite par trois lignes et trois colonnes. Les trois lignes qui sont dans le sens transversal de l'écoulement de la résine consistent en la ligne A (la ligne la plus éloignée du seuil d'injection qui est construite à partir des points A1, A3 et A5), la ligne I (la ligne au centre de l'éprouvette qui est construite à partir des points I1, I3 et I5) et la ligne Q (la ligne la plus proche du seuil d'injection qui est construite à partir des points Q1, Q3 et Q5). Les trois colonnes qui sont dans le sens de l'écoulement de la résine consistent en la colonne 1 (située près du centre du moule qui est construite à partir des points A1, I1 et Q1), la colonne 3 (située au centre de l'éprouvette qui est construite à partir des points A3, I3 et Q3) et la colonne 5 (située la plus éloigné du centre du moule qui est construite à partir des points A5, I5 et Q5). Le plan de référence est présenté par le rectangle de couleur grise qui est défini par les coordonnées des points A3, Q1 et Q5 de chacune des éprouvettes. Donc, chaque éprouvette possède son plan de référence unique. Les positions des trois lignes et des trois colonnes sur la surface de l'éprouvette sont montrées à la Figure 2.8.

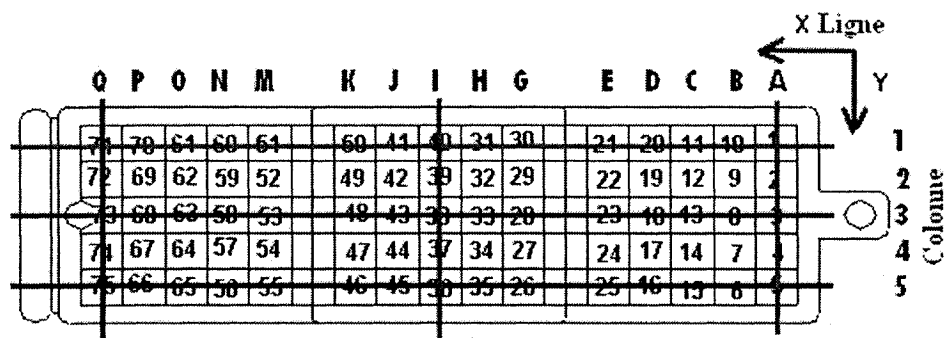


Figure 2.8 - Positions des trois lignes et des trois colonnes.

2.2.1 Coordonnées des éprouvettes

Les coordonnées des points mesurés sont indiquées par X_{ij} , Y_{ij} et Z'_{ij} (i représente les lignes de A à Q, j représente les colonnes de 1 à 5).

La façon de comparer les coordonnées des 75 points d'une éprouvette avec celles d'une autre ne semble pas une stratégie justifiée car chaque fois la mesure ne possède pas le même point d'origine, ni le même plan de référence. Cela signifie que les coordonnées ne viennent pas du même système de référence. Alors, ces coordonnées ne sont pas comparables. Donc, il faut trouver un système de référence unique.

Normalement, ce système peut être défini sans restriction par les coordonnées de trois points sur la surface des éprouvettes. Si trois points au centre des éprouvettes sont choisis (par exemple, les points G1, K1 et I5), le système de référence varie beaucoup d'une éprouvette à l'autre. Ces points ne peuvent pas être considérés comme un système de référence pour toutes les éprouvettes. Quand les coordonnées des points A3, Q1 et Q5 sont utilisées, ce système est stable et le système de référence varie moins. Lors de l'analyse des résultats au chapitre 4, on remarquera que les coordonnées en Z sont plus stables aux deux extrémités des éprouvettes. Le plan défini par ces points est bien sûr plus stable. Donc, toutes les coordonnées sont transformées par rapport au système de référence défini par les points A3, Q1 et Q5. La première étape consiste donc à trouver le plan de référence.

Supposons le plan de référence suivant :

$$\begin{cases} Z''_{A3} = aX_{A3} + bY_{A3} + c \\ Z''_{Q1} = aX_{Q1} + bY_{Q1} + c \\ Z''_{Q5} = aX_{Q5} + bY_{Q5} + c \end{cases} \Rightarrow \text{on obtient } \begin{cases} a \\ b \\ c \end{cases} \quad (2.1)$$

Donc, le plan de référence, '0' plan, est :

$$Z''_{0ij} = aX_{ij} + bY_{ij} + c \quad (2.2)$$

Donc, les coordonnées des points correspondant au plan de référence sont :

$$Z'_{ij} = Z''_{ij} - Z''_{0ij} \quad (2.3)$$

Les coordonnées des points théoriques deviennent X_{ij} , Y_{ij} et Z'_{ij} .

2.2.2 Coordonnées des moules

Pour les moules, chacun est mesuré trois fois. La valeur moyenne de chaque configuration est utilisée comme référence de base. De la même façon, les coordonnées des moules sont obtenues, soit X_{ij} , Y_{ij} et $Z'_{ijmoule}$.

2.2.3 Paramètres de gauchissement

Le gauchissement est obtenu à partir des valeurs des coordonnées qui s'écartent de celles du moule, donc les nouvelles coordonnées pour présenter le gauchissement sont obtenues, soit X_{ij} , Y_{ij} et Z_{ij} .

$$Z_{ij} = Z'_{ij} - Z'_{ijmoule} \quad (2.4)$$

Comparer les coordonnées de déformation obtenues de 75 points de chaque éprouvette ne peut pas donner une information numérique et globale sur la déformation des éprouvettes. Donc, il faut trouver une façon efficace qui puisse montrer le gauchissement. Ainsi, une série de paramètres sont proposés. Leurs noms et leur signification sont montrés au Tableau 2.1 et présentés aux Figures 2.9 et 2.10.

Tableau 2.1 - Définitions des paramètres analysés. Z' est la valeur correspondant à la référence transformée, laquelle est définie par les points extrêmes d'une ligne ou d'une colonne

Noms des paramètres	Signification
Déformation	Écart entre la valeur de Z du point le plus haut d'une éprouvette avec celle du point le plus bas de la même éprouvette
Torsion A	Angle de torsion de la ligne A par rapport au plan de référence
Torsion I	Angle de torsion de la ligne I par rapport au plan de référence
Flexion A	Valeur absolue maximale de Z' d'un point sur la ligne A
Flexion I	Valeur absolue maximale de Z' d'un point sur la ligne I
Flexion Q	Valeur absolue maximale de Z' d'un point sur la ligne Q
Torsion 1	Angle de torsion de colonne 1 par rapport au plan de référence
Torsion 3	Angle de torsion de colonne 3 par rapport au plan de référence
Torsion 5	Angle de torsion de colonne 5 par rapport au plan de référence
Flexion 1	Valeur absolue maximale de Z' d'un point sur la colonne 1
Flexion 3	Valeur absolue maximale de Z' d'un point sur la colonne 3
Flexion 5	Valeur absolue maximale de Z' d'un point sur la colonne 5

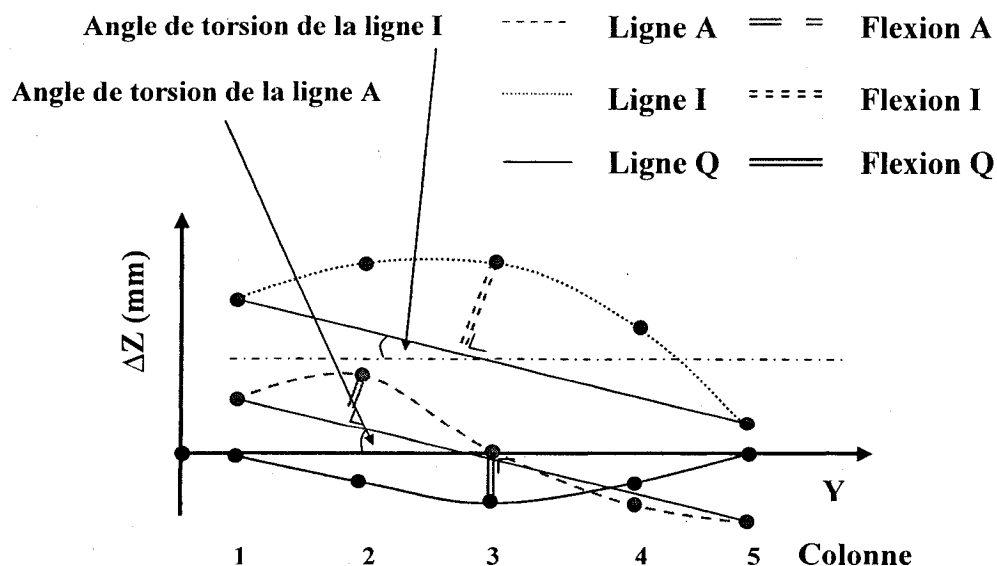


Figure 2.9 - Angles de torsion et flexion dans le sens transversal (les lignes montrent les distorsions perpendiculaires à l'écoulement).

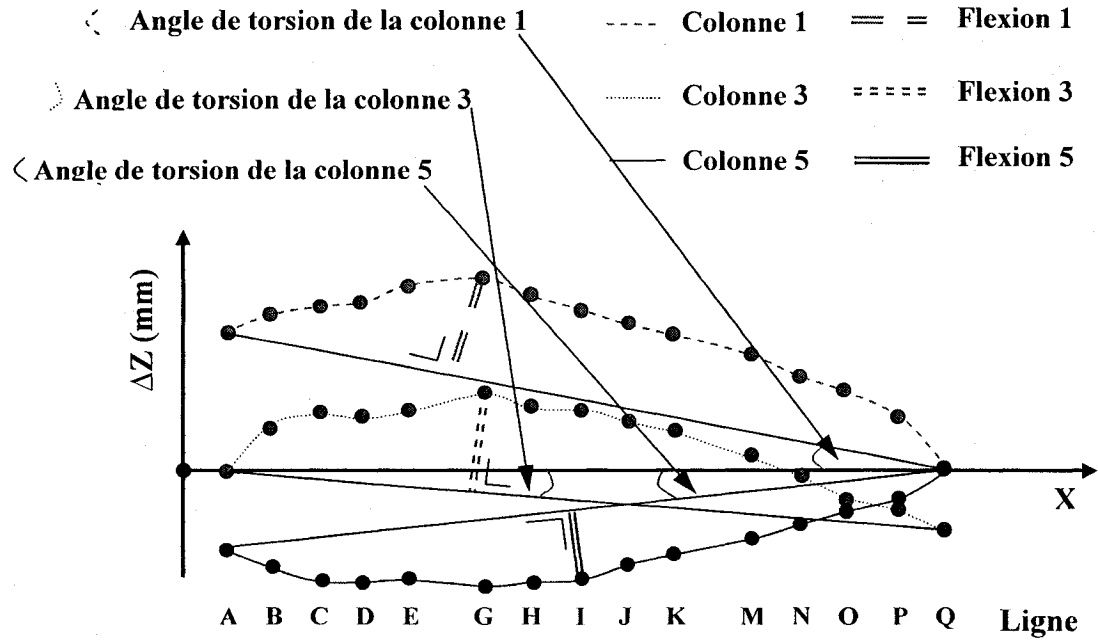


Figure 2.10 - Angles de torsion et flexion dans le sens de l'écoulement (les colonnes montrent les distorsions parallèles à l'écoulement).

Paramètres de description du gauchissement :

1) Déformation de l'éprouvette

$$\Delta Z_{\max} = Z_{ij \max} - Z_{ij \min} \quad (2.5)$$

2) Torsion de l'éprouvette

Ces valeurs impliquent la direction et la magnitude de torsion de l'éprouvette.

Angle de torsion de la ligne A :

$$\tan \alpha_A = \frac{\Delta Z_A}{\Delta Y_A} = \frac{\Delta Z_{A5} - \Delta Z_{A1}}{Y_{A5} - Y_{A1}} \quad (2.6)$$

$$\alpha_A = \arctan \frac{\Delta Z_A}{\Delta Y_A} = \arctan \frac{\Delta Z_{A5} - \Delta Z_{A1}}{Y_{A5} - Y_{A1}} \quad (2.7)$$

Angle de torsion de la ligne I :

$$\alpha_I = \arctan \frac{\Delta Z_I}{\Delta Y_I} = \arctan \frac{\Delta Z_{I5} - \Delta Z_{I1}}{Y_{I5} - Y_{I1}} \quad (2.8)$$

Angle de torsion de la ligne Q :

$$\alpha_Q = 0 \quad (2.9)$$

Angle de torsion de la colonne 1 :

$$\alpha_1 = \arctan \frac{\Delta Z_1}{\Delta X_1} = \arctan \frac{\Delta Z_{Q1} - \Delta Z_{A1}}{X_{Q1} - X_{A1}} \quad (2.10)$$

Angle de torsion de la colonne 3 :

$$\alpha_3 = \arctan \frac{\Delta Z_3}{\Delta X_3} = \arctan \frac{\Delta Z_{Q3} - \Delta Z_{A3}}{X_{Q3} - X_{A3}} \quad (2.11)$$

Angle de torsion de la colonne 5 :

$$\alpha_5 = \arctan \frac{\Delta Z_5}{\Delta X_5} = \arctan \frac{\Delta Z_{Q5} - \Delta Z_{A5}}{X_{Q5} - X_{A5}} \quad (2.12)$$

3) Flexion de déformation des lignes et des colonnes

Sur la ligne A, les coordonnées de déformation sont X_{Aj} , Y_{Aj} et Z_{Aj} . La ligne de base est :

$$\begin{cases} \Delta Z_{A1} = \alpha_A Y_{A1} + C_A \\ \Delta Z_{A5} = \alpha_A Y_{A5} + C_A \end{cases} \Rightarrow \text{On obtient } \begin{cases} \alpha_A \\ C_A \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\Delta Z_{0Aj} = \alpha_A Y_{Aj} + C_A \quad (2.14)$$

$$\Delta Z(A)_{0Aj} = Z_{Aj} - Z_{0Aj} \quad (2.15)$$

La flexion maximale de l'éprouvette au niveau de la ligne A est presque égale à la valeur absolue de la plus grande de $\Delta Z(A)_{0Aj}$.

De la même façon, $\Delta Z(I)_{0Ij}$, $\Delta Z(Q)_{0Qj}$, $\Delta Z(1)_{0i1}$, $\Delta Z(3)_{0i3}$ et $\Delta Z(5)_{0i5}$ sont obtenus.

2.3 Évaluation du système de mesure

2.3.1 Introduction

Si la méthode de mesure est peu fiable, la conclusion obtenue sera invalide ou nulle. Pour cette raison, il faut d'abord évaluer le système de mesure et surtout étudier la répétabilité et la reproductibilité du système de mesure. La répétabilité est le reflet de la précision du système de mesure et correspond à la variation des mesures répétées (sur la même éprouvette par le même opérateur). La reproductibilité est le reflet de l'exactitude du système de mesure et correspond à la variation des moyennes de mesure des opérateurs.

Les mesures sont faites avec 2 opérateurs et 3 éprouvettes. Chaque opérateur fait 3 mesures sur chacune des 3 éprouvettes avec la même machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) LK Metrology Systems modèle G90C 8.7.6. Selon le guide du fabricant, cette machine a une précision de $4,57\text{ }\mu\text{m}$ pour chacun des trois axes et une résolution de $0,1\text{ }\mu\text{m}$ (**Quality Digest, January 2002**).

Dans cette étude, chaque éprouvette fournit 225 valeurs correspondant aux coordonnées en X_{ij} , Y_{ij} et Z_{ij} des 75 points de chaque carré à la surface d'une éprouvette. Les carrés sont divisés en colonnes et en lignes. Les colonnes sont nommées par des chiffres allant de 1 à 5 et les lignes par des lettres allant de A à Q. L'éprouvette est détaillée à la Figure 2.11.

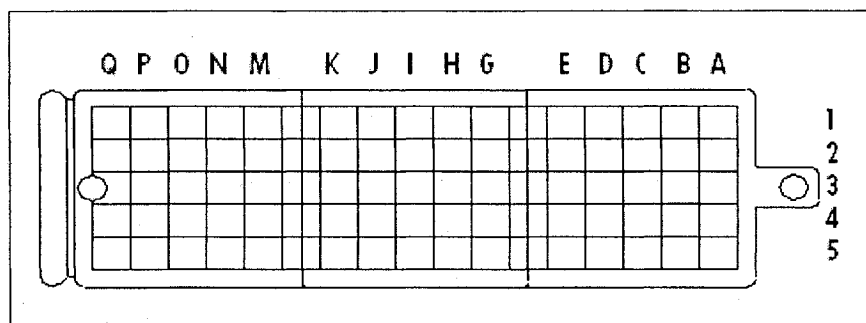


Figure 2.11 - Représentation des colonnes et des lignes d'une éprouvette.

Les paramètres du gauchissement des éprouvettes sont calculés à l'aide du logiciel MATLAB (R2006b) et les résultats sont résumés dans les Tableaux 2.2 et 2.3.

Tableau 2.2 - Déformation, flexions maximales et angles de torsion dans le sens transversal à l'écoulement

Opérateur	Pièce	Fois	Déformation	Torsion A	Torsion I	Flexion A	Flexion I	Flexion Q
1	1	1	0,22472	-0,08561	-0,09678	-0,01869	-0,02494	-0,05551
1	2	1	0,21095	-0,03425	-0,07270	-0,02055	-0,01802	-0,04589
1	3	1	0,15585	-0,04312	-0,08628	-0,01454	-0,01599	-0,04246
1	1	2	0,22454	-0,08273	-0,09754	-0,01767	-0,02436	-0,05469
1	2	2	0,21162	-0,03300	-0,07060	-0,02042	-0,01754	-0,04554
1	3	2	0,15591	-0,04155	-0,08650	-0,01473	-0,01543	-0,04147
1	1	3	0,22491	-0,08098	-0,09695	-0,01711	-0,02315	-0,05369
1	2	3	0,21193	-0,03305	-0,07051	-0,02051	-0,01818	-0,04653
1	3	3	0,15670	-0,03969	-0,08636	-0,01417	-0,01722	-0,04136
2	1	1	0,22708	-0,08214	-0,09850	-0,01660	-0,02318	-0,05244
2	2	1	0,21317	-0,03456	-0,07478	-0,02050	-0,01810	-0,04545
2	3	1	0,15689	-0,03838	-0,08544	-0,01402	-0,01595	-0,04123
2	1	2	0,22650	-0,08073	-0,09792	-0,01697	-0,02331	-0,05140
2	2	2	0,21403	-0,03394	-0,07385	-0,01909	-0,01785	-0,04625
2	3	2	0,15712	-0,03834	-0,08778	-0,01515	-0,01661	-0,04161
2	1	3	0,22658	-0,08048	-0,09821	-0,01713	-0,02185	-0,05146
2	2	3	0,21341	-0,03232	-0,07384	-0,01977	-0,01795	-0,04688
2	3	3	0,15744	-0,03797	-0,08673	-0,01433	-0,01678	-0,04106

Tableau 2.3 - Flexions maximales et angles de torsion dans le sens parallèle à l'écoulement

Opérateur	Pièce	Fois	Torsion 1	Torsion 3	Torsion 5	Flexion 1	Flexion 3	Flexion 5
1	1	1	-0,01573	-0,01613	0,00634	0,13599	0,11188	0,09893
1	2	1	-0,00877	-0,01333	0,00005	0,14654	0,11937	0,10326
1	3	1	-0,00778	-0,01234	0,00333	0,07955	0,03995	-0,02826
1	1	2	-0,01523	-0,01589	0,00610	0,13769	0,11364	0,09940
1	2	2	-0,00887	-0,01323	-0,00037	0,14737	0,12043	0,10330
1	3	2	-0,00738	-0,01205	0,00334	0,08057	0,03903	-0,02829
1	1	3	-0,01501	-0,01560	0,00587	0,13953	0,11514	0,10024
1	2	3	-0,00893	-0,01352	-0,00041	0,14655	0,12000	0,10255
1	3	3	-0,00746	-0,01202	0,00279	0,08140	0,04041	-0,02885
2	1	1	-0,01487	-0,01524	0,00630	0,14325	0,11574	0,10114
2	2	1	-0,00904	-0,01320	-0,00012	0,14864	0,12082	0,10280
2	3	1	-0,00678	-0,01198	0,00312	0,08266	0,03968	-0,02805
2	1	2	-0,01479	-0,01493	0,00601	0,14388	0,11634	0,10158
2	2	2	-0,00888	-0,01344	-0,00011	0,14904	0,12221	0,10180
2	3	2	-0,00720	-0,01209	0,00269	0,08267	0,04017	-0,02903
2	1	3	-0,01481	-0,01495	0,00592	0,14383	0,11770	0,10105
2	2	3	-0,00858	-0,01362	-0,00025	0,14841	0,12170	0,10242
2	3	3	-0,00688	-0,01193	0,00291	0,08323	0,04026	-0,02718

2.3.2 Présentation des résultats

Parmi les 12 paramètres, on a tout d'abord choisi d'analyser la déformation à l'aide du logiciel STATISTICA (version 7.0). Les valeurs sont présentées graphiquement à la Figure 2.12 avec un intervalle de confiance de 95 % (les moyennes des cellules sont représentées avec leurs intervalles de confiance de niveau $1-\alpha = 0,95$).

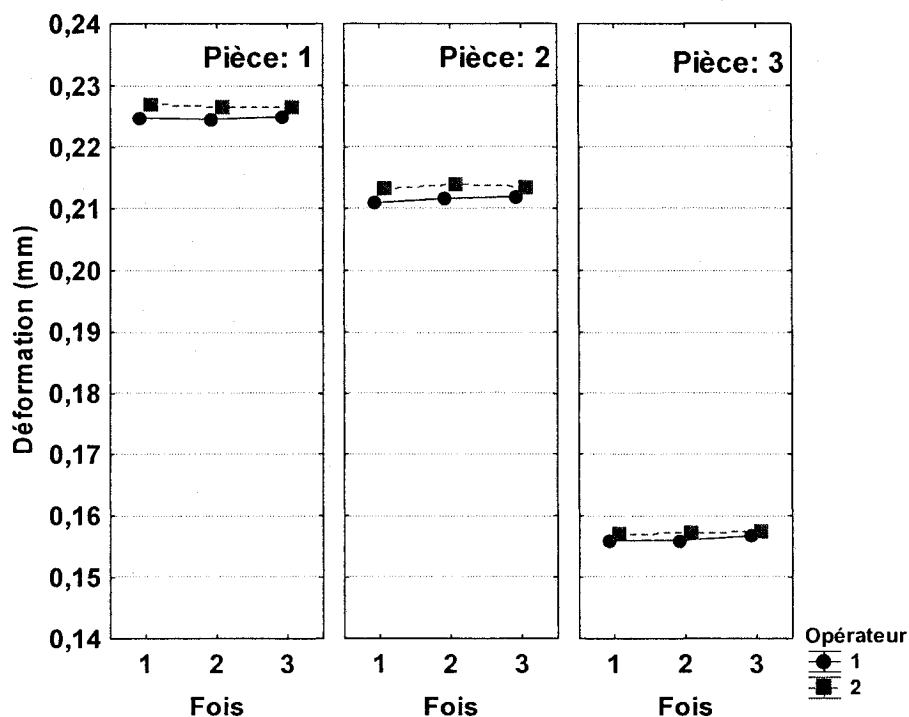


Figure 2.12 - Déformation des éprouvettes.

2.3.3 Carte de contrôle des étendues

Avant l'évaluation de la répétabilité, la première étape consiste à analyser la carte de contrôle des étendues (Carte_R). Le graphique statistique obtenu est montré à la Figure 2.13. Cette carte affiche directement l'amplitude de l'erreur de mesure de la machine. Chaque étendue (la valeur R) a été calculée à partir de trois mesures répétées sur la même éprouvette effectuée par le même opérateur. Dans ce graphique, aucun indicateur ne se situe en dehors de la limite de commande supérieure. La carte R est sous contrôle. Les opérateurs n'ont pas de difficulté pour faire des mesures et pour obtenir des données cohérentes. Donc, le système est cohérent et les valeurs peuvent être utilisées pour évaluer la répétabilité.

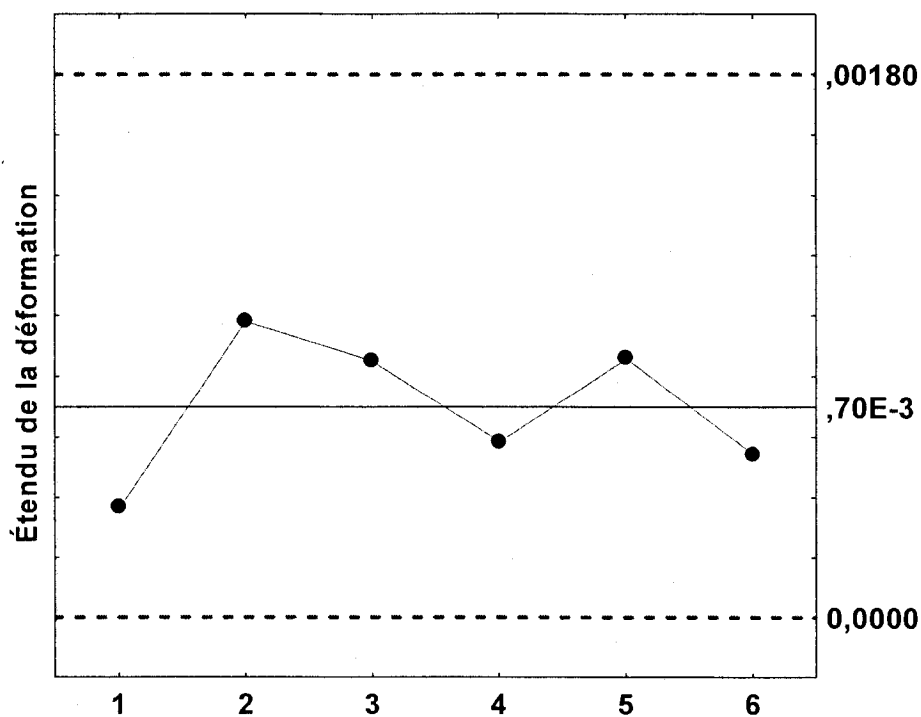


Figure 2.13 - Graphique statistique de la carte d'étendue des déformations.

2.3.4 Carte de contrôle des moyennes

La deuxième étape consiste à estimer la variation d'une éprouvette à l'autre. Le graphique statistique de la carte de contrôle des moyennes de déformation par opérateur est montré à la Figure 2.14. Cette carte des moyennes affiche le pouvoir de discrimination de la machine. Dans ce graphique, toutes les moyennes de sous-groupe sont en dehors des limites de commande et donc, ce système de mesure est suffisant pour détecter la variation d'une éprouvette à l'autre.

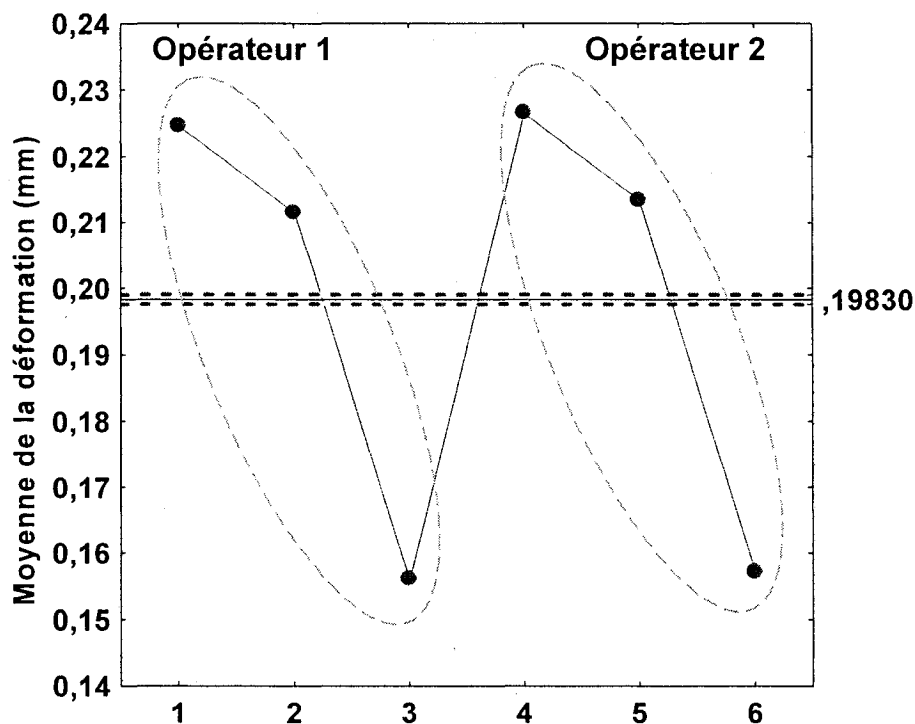


Figure 2.14 - Graphique statistique de la carte des moyennes de déformation par opérateur.

2.3.5 Répétabilité et reproductibilité du système de mesure

La troisième étape consiste à évaluer la variation de la répétabilité et de la reproductibilité combinée (R&R) par rapport à la variation totale. Les résultats sont présentés au Tableau 2.2. La dernière colonne donne les pourcentages de la variabilité de chacune des sources par rapport à la variation totale. Selon les métrologues (**Ostle et al., 1996**), la valeur du R&R au-dessous de 10 % est acceptable. Dans l'analyse de la déformation actuelle, le R&R est de 0.1193 %. Cette valeur est très inférieure à la limite de commande supérieure et est jugée acceptable. La méthode de mesure utilisée pour analyser la déformation de l'éprouvette est donc valable.

Tableau 2.4 - Combinaison de la répétabilité et de la reproductibilité du système de mesure

Source (Sigma=R-bar/d2)	Variance Components; Variable: Déformation (R&R.sta) Mean=,198297 R-bar=,699E-3 R(xbar)=,168E-2 R(parts)=,691E-1 Operators: 2 Parts: 3 Trials: 3	
	% of R & R	% of Total
Repeatability	10,4597	0,0125
Reproducibility	89,5403	0,1068
Part-to-Part		99,8807
Combined R & R	100,0000	0,1193
Total		100,0000

La quatrième étape consiste à analyser graphiquement la répétabilité et reproductibilité combinée. Le diagramme de R&R est montré à la Figure 2.15. Cette figure représente la variation du système de mesure des opérateurs. Celle de l'opérateur 1 est de 2 μm et celle de l'opérateur 2 est de 1,6 μm .

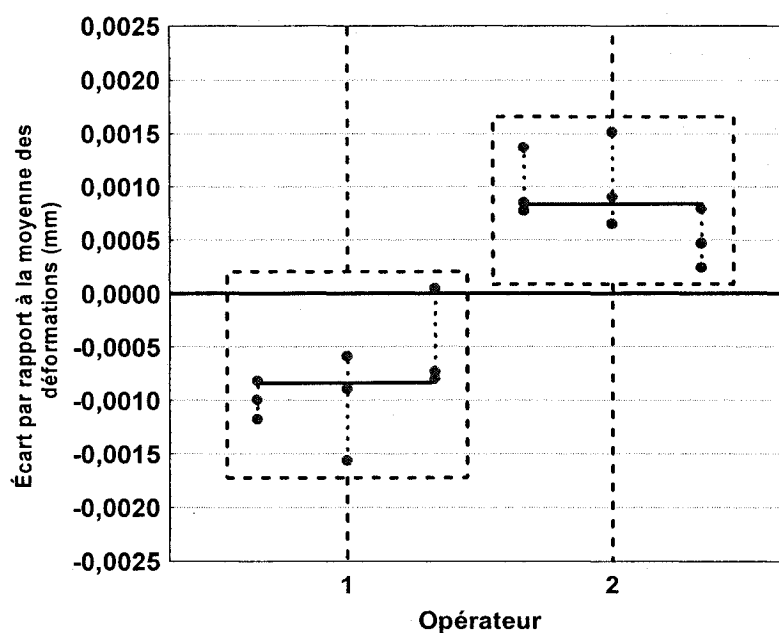


Figure 2.15 - Répétabilité et reproductibilité combinées du système de mesure, 2 opérateurs, chacun fait 3 mesures sur 3 éprouvettes.

2.3.6 Synthèse des paramètres

Les 11 autres paramètres sont aussi analysés à l'aide du logiciel STATISTICA. Les résultats obtenus sont présentés au Tableau A1 de l'Annexe 1. Toutes les cartes R démontrent que les qualités sont contrôlées. La répétabilité et reproductibilité combinées des 12 paramètres analysés du système de mesure varient de 0,0087 % à 4,1498 %. Ces valeurs sont acceptables selon les métrologues. Donc, le système de mesure est suffisamment précis et exact pour acquérir des données fiables.

3 MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL

Dans ce chapitre, toutes les informations concernant la phase expérimentale du projet seront présentées. Cela inclut une présentation des équipements et du matériel utilisé, ainsi qu'une description détaillée de la méthode de mesure du gauchissement des éprouvettes.

3.1 Fabrication des éprouvettes par injection

Cette section présente la presse à injection, le matériel et les paramètres de fabrication utilisés pour fabriquer les éprouvettes.

3.1.1 Presse à injection

Le Centre de Recherche En Plasturgie et Composites (CREPEC) possède une presse à injection électrique, Sumitomo SE50S, ainsi qu'une série de moules. Ces moules ne sont pas conformes pour les besoins de la fabrication des éprouvettes plastiques pour l'analyse du gauchissement. Monsieur Joël Pomerleau, ancien étudiant de l'École Polytechnique de Montréal en génie mécanique, a conçu un moule et les inserts pour analyser le retrait du plastique en moulage par injection dans le cadre de son projet de maîtrise en 2004. Ce moule, de même que ces inserts, sont utilisés dans la présente étude.

3.1.2 Matériau utilisé

Deux types de résines sont utilisés dans cette étude : les polypropylènes HIVAL 2420NA de General Polymers et Pro-fax SG899 de Basell. Le Tableau 3.1 présente les informations techniques de ces deux types de résines.

Tableau 3.1 - Fiche technique du matériel utilisé

	HIVAL 2420NA (1) *	Pro-fax SG899 (2) *
Type de la résine	Homopolymère	Copolymère impact
Densité g/cm ³	0.902 ASTM D792B	0.9 ASTM D792
Indice de fluidité g/10 min	20.0 ASTM D1238	35.0 ASTM D1238

3.1.3 Moule et inserts utilisés

La Figure 3.1 présente les trois géométries d'éprouvettes étudiées.

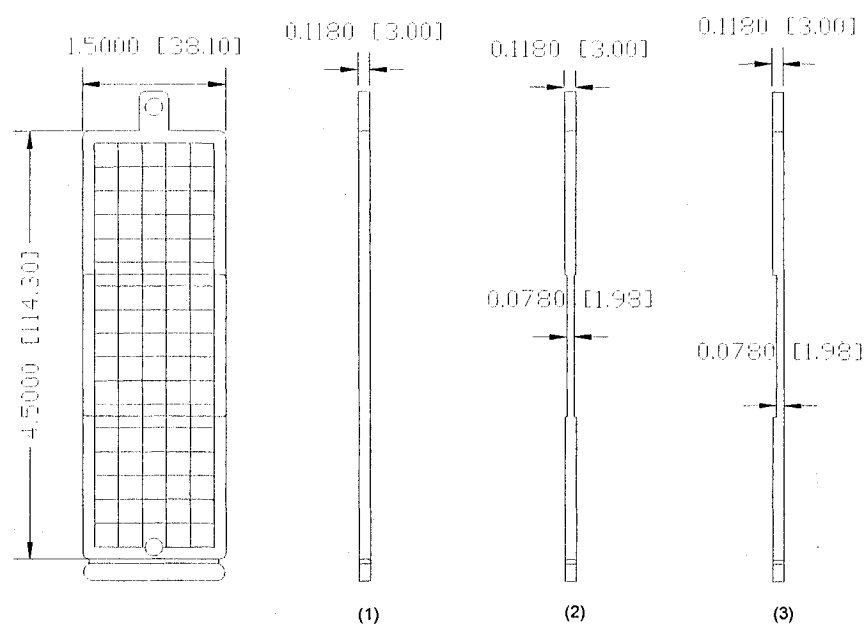


Figure 3.1 - Géométries des éprouvettes. (1) épaisseur constante, (2) épaisseur variable et géométrie symétrique, (3) épaisseur variable et géométrie asymétrique.

Pour obtenir les trois géométries d'éprouvettes, il y a trois profils d'inserts. Les profils sont définis par deux inserts dont l'un est celui de la partie mobile et l'autre celui de la partie fixe du moule.

La partie mobile tout comme la partie fixe possède une cavité rectangulaire pour les inserts. Afin d'avoir un moulage équilibré, deux éprouvettes sont injectées simultanément. La cavité de droite est munie d'un seuil en film, alors que celle de gauche possède un seuil latéral de section rectangulaire.

Lors de la fabrication des éprouvettes, on constate que l'insert avec le seuil en film se remplit beaucoup plus rapidement que l'insert avec le seuil latéral. La Figure 3.2 montre la phase du remplissage des cavités. Si les deux cavités possèdent une perte de charge identique, les deux cavités sont remplies simultanément, comme montré en A à la Figure 3.2. En analysant les éprouvettes moulées, on note que les éprouvettes moulées dans la cavité avec un seuil en film sont pleines, alors que celles moulées dans la cavité avec un seuil latéral sont seulement remplies à la moitié du volume de l'insert. Cela signifie que la perte de charge dans le seuil latéral est plus grande que celle du seuil en film, tel que montré en B à la Figure 3.2. La couleur plus foncée indique la température plus élevée de la résine. Par conséquent, le moulage des deux éprouvettes ne se fera pas simultanément et les canaux d'alimentation vers la cavité avec un seuil latéral sont obstrués.

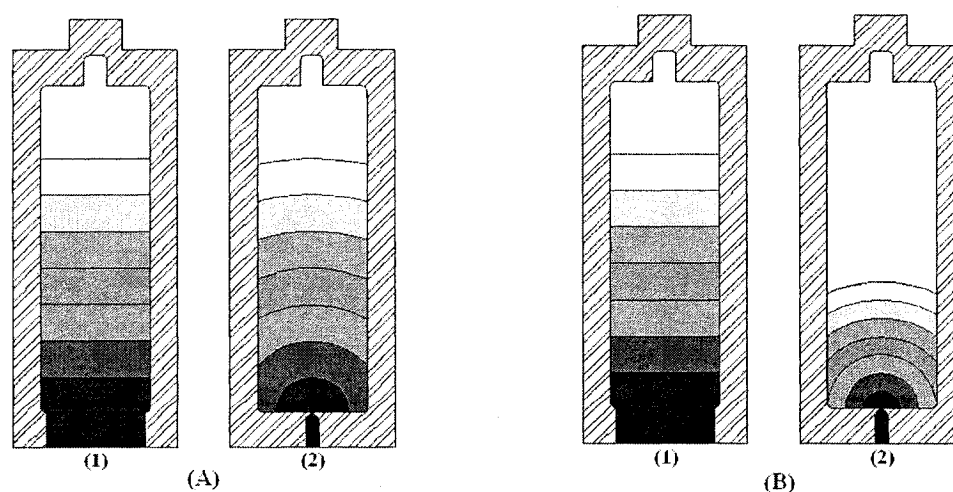


Figure 3.2 - (1) cavité avec un seuil en film; (2) cavité avec un seuil latéral

3.2 Paramètres de fabrication et leur influence sur le gauchissement des éprouvettes

3.2.1 Température du moule

La température du moule est contrôlée par le système de refroidissement relié à la presse à injection. Le liquide réfrigérant est de l'eau. Ce système est efficace pour maintenir la température du moule constante. Cette température est inférieure à la température de la résine. Donc, quand la résine est injectée dans la cavité, les surfaces de l'éprouvette refroidissent plus rapidement que l'intérieur. Pour les résines semi-cristallines, ce phénomène implique une cristallisation plus faible à l'extérieur qu'à l'intérieur et provoque un retrait non uniforme dans une éprouvette. Si cette température est trop basse, le moule ainsi que la paroi de la cavité sont trop froids, les surfaces extérieures de l'éprouvette refroidissent très rapidement, alors que le centre est encore à l'état liquide. Ceci provoque davantage de retrait non uniforme ainsi que la formation de contraintes résiduelles importantes.

Dans le cas contraire, si le moule est trop chaud, le temps de refroidissement devra être plus long, ce qui allonge le temps de cycle de moulage et augmente le coût de fabrication.

Dans la fabrication réelle, il faut s'assurer que le moule soit à une température convenable. Dans cette étude, la température du moule est fixée à 20°C ou 50°C pour analyser l'effet de la température du moule sur le gauchissement.

3.2.2 Vitesse d'injection

La vitesse d'injection est la vitesse à laquelle la résine à l'état liquide est injectée dans la cavité du moule. Si elle est trop élevée, il risque d'y avoir des défauts de surface sur l'éprouvette. Ceci est d'autant plus important pour les géométries complexes. Une

vitesse élevée peut augmenter la pression d'injection dans la cavité du moule, ce qui peut ouvrir le moule et entraîner la formation de bavures.

En revanche, si la vitesse d'injection est trop faible, la résine n'aura pas assez de temps pour être injectée dans la cavité avant que la résine ne se refroidisse et l'éprouvette sera incomplète. La résine se solidifiera avant d'avoir complètement rempli la cavité du moule, ce qui fait aussi augmenter la pression d'injection.

Afin d'éviter ces deux problèmes, deux paliers de vitesse sont utilisés. La vitesse dans le deuxième palier est fixée à une valeur constante de 20 mm/s, tandis que celle du premier palier varie de 20 mm/s à 100 mm/s afin d'analyser l'effet de la vitesse d'injection sur le gauchissement.

3.2.3 Pression de maintien

La pression de maintien est la pression appliquée à la résine dans la cavité du moule une fois la phase d'injection terminée. Elle sert à ajouter encore un peu de résine dans la cavité du moule pour compenser le changement de volume spécifique de la résine à l'intérieur de la cavité qui est causé par la cristallisation du polymère et le refroidissement de la matière. La pression de maintien assure que le moule soit toujours bien rempli et qu'il n'y ait pas de vide à l'intérieur de l'éprouvette et/ou de retassures à la surface de la pièce. La valeur de la pression de maintien est soit plus élevée que la pression d'injection, soit inférieure selon la demande. Dans la Figure 2.5 du diagramme PVT, le passage de B à C montre cette phase. Dans cette phase, si la pression de maintien est trop élevée, il y aura trop de résine ajoutée dans la cavité du moule ce qui peut causer la formation de bavures, de contraintes résiduelles dans l'éprouvette et surtout des problèmes de surcompactage.

Dans cette étude, trois valeurs sont choisies, soit plus faible que la pression d'injection, égale ou plus élevée que celle-ci. Ces valeurs sont 15, 30 et 45 MPa.

3.2.4 Temps de maintien

Le temps de maintien est la durée pendant laquelle on applique la pression de maintien à la résine dans la cavité. Ce temps doit être suffisamment long. S'il est trop court, la phase de pression de maintien termine trop tôt et la matière reflue vers les canaux d'alimentation, tel que montré à la Figure 2.6 et cette phase se terminera au point C' au lieu de C. Les phases suivantes deviendront donc C' à D' et D' à E'. Ceci causera une modification plus importante du volume spécifique et développera davantage de retrait. Si au contraire, le temps est trop long, une fois que le seuil d'injection est figé, aucune résine ne pourra entrer dans la cavité et donc la pression de maintien devient inutile. En réalité, la phase de maintien passe au refroidissement. Il faut donc surtout déterminer le temps minimum nécessaire.

Le temps de maintien minimum est déterminé selon le processus suivant : avec les autres paramètres maintenus constants, un court temps de maintien est tout d'abord choisi; une éprouvette est moulée et son poids est pesé et noté; puis on augmente graduellement le temps de maintien jusqu'à ce que le poids de l'éprouvette reste constant. Cette valeur de temps est le temps de maintien nécessaire.

3.2.5 Température de la résine

La résine est chauffée et plastifiée dans le fourreau pour ensuite être injectée dans la cavité du moule. La température de la résine peut être trouvée dans le guide de fabrication fourni par le fabricant. Plus la température de la résine est élevée, plus la viscosité de la résine diminue et meilleure sera la propagation de l'écoulement dans la cavité. Toutefois, il faut s'assurer que la température utilisée ne soit pas supérieure à la température de dégradation de la résine. De plus, lorsque la résine injectée est très

chaude, il faut compter un temps de refroidissement plus élevé, ce qui hausse le coût de fabrication.

Dans cette étude, la résine est chauffée progressivement dans le fourreau de la presse en quatre paliers : 175 °C, 185 °C, 190 °C et 205 °C.

3.2.6 Position de la vis de plastification

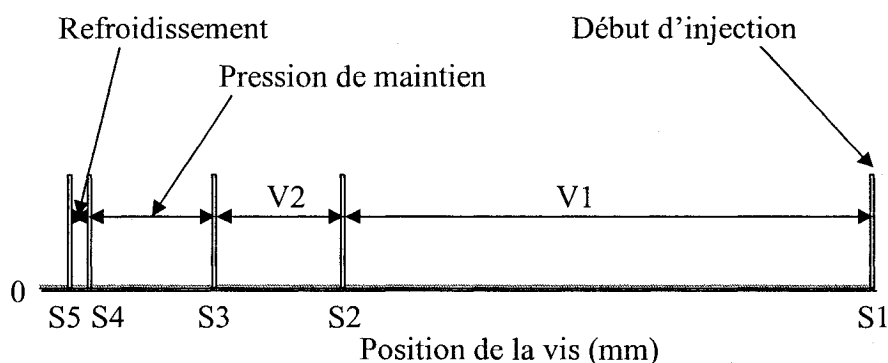


Figure 3.3 - Position de la vis lors du remplissage.

La position de la vis de la presse peut être définie, voir la Figure 3.3. La première position S1 définit le volume de résine qui sera plastifié. C'est le dosage nécessaire pour remplir la cavité du moule ainsi que les canaux d'alimentation. Cette valeur doit se situer entre 20 % et 80 % de la capacité de dosage de la presse. De cette position, la phase d'injection commence. La vis avance à la vitesse du premier palier V1 et injecte de la résine dans la cavité du moule. Quand la vis arrive à la position S2, la vitesse change de V1 à V2, la vis avance encore. Quand la vis arrive à la position S3, la phase de remplissage est terminée. Le processus passe de la phase d'injection à la phase de maintien. Une quantité de résine est poussée dans la cavité sous la pression de maintien durant le temps de maintien. La vis avance un peu et arrive à la position S4. C'est la fin de l'injection. Cette position est indéfinie mais il faut garder un coussin de résine (généralement 1 mm d'épais) pour la sécurité. Si cette position est trop avancée (moins que 1 mm), il faut alors augmenter les valeurs de S1, S2 et S3 afin de déplacer la vis et donc augmenter le dosage.

La distance entre S1 et S2 représente le premier palier de vitesse d'injection. Il faut s'assurer que lorsque la vis atteint la position S2, l'éprouvette soit presque remplie. La distance entre S2 et S3 représente le deuxième palier de vitesse d'injection. Il faut s'assurer qu'à la position S3, l'éprouvette soit complètement remplie.

À la fin de la phase de maintien, le système donne une position de la vis de plastification correspondant à S5. À la fin de l'injection, le système de contrôle de la presse donne une valeur de coussin de la résine correspondant à la position finale de la vis, S4. Il faut que les valeurs S5 et S4 soient égales. Si la valeur en S5 est plus petite que celle en S4, ceci implique que la vis recule après la fin du maintien et signifie qu'une certaine quantité de résine reflux de la cavité vers les canaux d'alimentation de la pièce. Durant le moulage des éprouvettes pour cette étude, on s'est assuré que ce principe soit bien respecté.

Les positions de la vis sont déterminées pour chaque type de résines et de géométries des éprouvettes, étant donné que chaque résine possède ses propres caractéristiques rhéologiques et que chaque géométrie de la cavité d'insert implique une perte de charge différente. Pour une résine et une géométrie donnée, les vitesses d'injection V1 et V2 sont définies et les distances entre S1 et S2 et S2 et S3 sont déterminées et demeurent constantes. La position S4 varie autour de 1 mm et est plutôt constante. La distance entre S3 et S4 varie linéairement avec la pression de maintien. Par la suite, il faut ajuster les positions S3, S2 et S1. Ceci implique que le dosage de la résine augmente car une haute pression de maintien peut pousser davantage de matière dans la cavité.

3.2.7 Temps de refroidissement et plastification

Au cours de cette phase, la presse à injection effectue deux tâches simultanément : le moule reste fermé pendant le refroidissement de la pièce et la vis de la presse tourne afin de plastifier la matière nécessaire pour le prochain cycle d'injection.

3.2.7.1 Temps de refroidissement

Le temps de refroidissement est le temps nécessaire pour permettre aux éprouvettes d'être assez rigides pour être éjectées du moule. S'il est trop court, les éprouvettes seront complètement déformées par les éjecteurs parce que la matière est trop chaude et son module de rigidité est trop faible pour résister à la déformation. S'il est trop long, le coût de fabrication est augmenté inutilement. Dans cette étude, le temps de refroidissement est fixé à 15 secondes.

3.2.7.2 Temps de plastification

Au cours de la phase de plastification, la vis tourne et recule vers l'arrière jusqu'à la position S1. Les granules de plastique qui ont été mis dans la trémie sont chauffés et deviennent liquide. Une quantité de résine, appelée dosage de la matière, est déplacée en aval. Afin que le temps de cycle soit minimal, il faut que le temps de plastification soit inférieur au temps de refroidissement. Ainsi, le temps de plastification de la matière est un temps caché.

3.3 Effet connu des paramètres de fabrication

3.3.1 Effet des paramètres de fabrication

Le gauchissement est intimement lié au retrait et au changement d'épaisseur de l'éprouvette. Le Tableau 3.2 montre l'effet de certains paramètres de fabrication sur le retrait, le gauchissement ou le changement d'épaisseur. Il est clair que la pression de maintien a un effet prédominant. Le deuxième paramètre le plus influent est la température du moule. L'effet des autres paramètres : celui de la vitesse d'injection, du type de résine et du type de géométrie n'est pas clairement mentionné. Pour la vitesse d'injection, 5 auteurs affirment qu'elle a un effet significatif, 3 affirment le contraire et 8 ne se prononcent pas sur cet effet. Le type de résine et de géométrie est moins relaté.

Tableau 3.2 - Effet de certains paramètres de fabrication sur le retrait, le gauchissement ou le changement d'épaisseur, √ indique que l'auteur attribue l'effet significatif du paramètre sur le sujet
Les nombres 1, 2, 3 et 4 montrent l'importance relative de chaque paramètre lorsque mentionné.

Auteur	Sujet	Géométrie de l'éprouvette	Résine	Effet sur le retrait, le gauchissement ou le changement d'épaisseur d'une augmentation du paramètre					
				Géo.	Résine	Tm	Pm	Vinj	Autres
(Denizart, Vincent et al. 1995)	G	Disque	PS et PP		√	√	↓		
(Kurtaran, Ozelik et al. 2005)	G	Base de lampe de plafond d'autobus	ABS (GE)			√	√		Tr et trf
(Huang & Tai 2001)	G	Forme de boîte	PC/ABS	√		2	1	Non	3 (Tr) et 4 (tm)
(Jansen, Van Dijk et al. 1998)	R	Plaque	Amorphe		√	Non	↓	Non	Tr ↓
			Semi-cristalline				√		
(Kwak, Suzuki, et al. 2005)	Réduction d'épaisseur	Objectif optique	PMMA			√			Tr et trf
(Kennedy Peter & Zheng Rong)	R prédiction	Plaque	PP				√		
(Kramschuster, Cavitt et al. 2005)	R & G	Forme de boîte	PP				1	Non	2 (tm) et Tr (non)
(Leo & Cuveliez 1996)	Changement d'épaisseur	Plaque	HDPE					↑	Épaisseur du seuil
(Liu & Manzione 1996)	Épaisseur	Forme de boîte	PEI			↑	↑	↑	Tr ↑
			LCP/GM			↑	↑	√	Tr ↑
(Ozelik & Erzurumlu 2006)	G	Base de bouton de PC	POM			2	1		Tr, tm et trf
(Pomerleau & Sanschagrin 2006)	R	Plaque	PP	√			1 ↓	2	
(Postawa & Koszkuł 2005)	R et poids	Plaque	POM				1		
			PS			1	3		2(Tr)
(Régnier G. & Trotignon J.P. 1993)	R	Plaque	PA66				√	√	

Certains auteurs notent l'effet d'autres variables, telle la température de la résine. Trois auteurs constatent que le temps de refroidissement a un effet sur le gauchissement ou le changement d'épaisseur. Trois autres auteurs constatent que le temps de maintien a un effet sur le retrait et le gauchissement.

3.3.2 Paramètres de fabrication utilisés

Les trois paramètres de fabrication analysés dans cette étude et leurs valeurs sont résumés au Tableau 3.3. Tous les autres paramètres sont maintenus constants lors de la fabrication.

Tableau 3.3 - Paramètres étudiés et leurs combinaisons pour chaque résine et chaque géométrie

Codage	Température du moule (°C)	Pression de maintien (MPa)	Vitesse d'injection (V ₂ mm/s)
0	20	30	60
1	50	15	20
2	50	15	60
3	50	15	100
4	50	30	20
5	50	30	60
6	50	30	100
7	50	45	20
8	50	45	60
9	50	45	100

3.4 Procédure de moulage

Pour chaque type de résine et chaque géométrie d'éprouvettes, il y a dix combinaisons différentes de conditions de mise en forme. Tout d'abord, les inserts avec la géométrie d'épaisseur constante sont installés et la résine HIVAL 2420NA est utilisée. La fabrication de l'éprouvette suit les étapes suivantes :

- (1) chauffer le moule à 50°C;
- (2) fixer la vitesse d'injection à 20 mm/s et la pression de maintien à 0 MPa;
- (3) fabriquer des éprouvettes et ajuster la position de vis (S1, S2 et S3) selon le besoin, garder S4 avec une certaine valeur;
- (4) appliquer la pression de maintien à 15 MPa, fabriquer des éprouvettes, garder toujours S4 autour de 1 mm et ajuster les positions de S1, S2 et S3,

mais maintenir la distance entre S1 et S2 ainsi que celle de S2 et S3 constantes;

- (5) augmenter la pression de maintien à 30 MPa, fabriquer des éprouvettes comme à l'étape (4);
- (6) augmenter la pression de maintien à 45 MPa, fabriquer des éprouvettes comme à l'étape (4);
- (7) changer la pression de maintien à 0 MPa et augmenter la vitesse d'injection à 60 mm/s;
- (8) répéter les étapes (2) à (6);
- (9) répéter les étapes (2) à (6) pour la vitesse d'injection 100 mm/s;
- (10) diminuer la température du moule à 20°C et la vitesse d'injection à 60 mm/s, répéter l'étape (3);
- (11) appliquer la pression de maintien à 30 MPa, répéter l'étape (4).

Les étapes (1) à (11) sont répétées pour les autres géométries et l'autre résine.

Les positions de la vis sont ajustées pour chaque résine, chaque géométrie et chaque condition de fabrication, ainsi que le dosage et la pression d'injection maximale générée et sont montrées au Tableau 3.4. Les corrélations entre ces divers paramètres sont montrées au Tableau 3.5. De ce tableau, on comprend que la pression durant la phase d'injection diminue avec l'augmentation de l'indice de fluidité, mais augmente quand l'épaisseur diminue au centre de l'éprouvette et quand la vitesse d'injection augmente.

3.5 Mesure des inserts

Dans cette étude, la surface de l'éprouvette qui correspond à la partie mobile a été choisie pour analyser le gauchissement des éprouvettes.

Tableau 3.4 - Positions de la vis, dosage et pression maximale d'injection

Résine	Géo	Tm	Pm	Vinj	S1	S2	S3	S4	Sv1	Sv2	Spm	Dosage	Pinjmax
1	1	20	30	60	38,60	8,60	6,60	1,03	30,00	2,00	5,57	37,57	43,3
1	1	50	15	20	37,00	6,20	4,60	1,24	30,80	1,60	3,36	35,76	30,2
1	1	50	15	60	37,00	7,00	5,00	1,38	30,00	2,00	3,62	35,62	40,1
1	1	50	15	100	37,00	8,70	5,10	1,43	28,30	3,60	3,67	35,57	45,9
1	1	50	30	20	38,60	7,80	6,20	1,46	30,80	1,60	4,74	37,14	29,9
1	1	50	30	60	38,60	8,60	6,60	1,27	30,00	2,00	5,33	37,33	40,1
1	1	50	30	100	38,60	10,30	6,70	1,50	28,30	3,60	5,20	37,10	49,5
1	1	50	45	20	40,00	9,20	7,60	1,39	30,80	1,60	6,21	38,61	31
1	1	50	45	60	40,00	10,00	8,00	1,37	30,00	2,00	6,63	38,63	41,4
1	1	50	45	100	40,00	11,70	8,10	1,33	28,30	3,60	6,77	38,67	48
1	2	20	30	60	36,70	8,40	6,30	1,12	28,30	2,10	5,18	35,58	45,9
1	2	50	15	20	35,30	5,70	4,50	1,44	29,60	1,20	3,06	33,86	33,2
1	2	50	15	60	35,30	7,00	4,90	1,47	28,30	2,10	3,43	33,83	44
1	2	50	15	100	35,30	8,00	5,00	1,48	27,30	3,00	3,52	33,82	51,4
1	2	50	30	20	36,70	7,10	5,90	1,42	29,60	1,20	4,48	35,28	33,3
1	2	50	30	60	36,70	8,40	6,30	1,44	28,30	2,10	4,86	35,26	44,2
1	2	50	30	100	36,70	9,40	6,40	1,42	27,30	3,00	4,98	35,28	51,5
1	2	50	45	20	38,00	8,40	7,20	1,33	29,60	1,20	5,87	36,67	33,4
1	2	50	45	60	38,00	9,70	7,60	1,29	28,30	2,10	6,31	36,71	44
1	2	50	45	100	38,00	10,70	7,70	1,20	27,30	3,00	6,50	36,80	51
1	3	20	30	60	36,20	7,90	5,90	0,66	28,30	2,00	5,24	35,54	46,6
1	3	50	15	20	35,00	5,40	4,20	1,19	29,60	1,20	3,01	33,81	33,3
1	3	50	15	60	35,00	6,70	4,70	1,15	28,30	2,00	3,55	33,85	43,7
1	3	50	15	100	35,00	7,70	4,70	1,18	27,30	3,00	3,52	33,82	51,4
1	3	50	30	20	36,20	6,60	5,40	0,95	29,60	1,20	4,45	35,25	33,3
1	3	50	30	60	36,20	7,90	5,90	0,97	28,30	2,00	4,93	35,23	44
1	3	50	30	100	36,20	8,90	5,90	0,92	27,30	3,00	4,98	35,28	51,8
1	3	50	45	20	37,50	7,90	6,70	0,84	29,60	1,20	5,86	36,66	33,3
1	3	50	45	60	37,50	9,20	7,20	0,90	28,30	2,00	6,30	36,60	43,9
1	3	50	45	100	37,50	10,20	7,20	0,96	27,30	3,00	6,24	36,54	51,3
2	1	20	30	60	37,70	7,60	5,60	1,24	30,10	2,00	4,36	36,46	35,3
2	1	50	15	20	37,20	5,70	4,70	1,39	31,50	1,00	3,31	35,81	26,8
2	1	50	15	60	37,20	7,10	5,10	1,40	30,10	2,00	3,70	35,80	35,7
2	1	50	15	100	37,20	8,20	5,20	1,37	29,00	3,00	3,83	35,83	40,9
2	1	50	30	20	38,70	7,20	6,20	1,49	31,50	1,00	4,71	37,21	26,8
2	1	50	30	60	38,70	8,60	6,60	1,47	30,10	2,00	5,13	37,23	35,2
2	1	50	30	100	38,70	9,70	6,70	1,45	29,00	3,00	5,25	37,25	41
2	1	50	45	20	40,00	8,50	7,50	1,36	31,50	1,00	6,14	38,64	27,3
2	1	50	45	60	40,00	9,90	7,90	1,29	30,10	2,00	6,61	38,71	36
2	1	50	45	100	40,00	11,00	8,00	1,34	29,00	3,00	6,66	38,66	42,5
2	2	20	30	60	36,80	8,40	6,40	1,23	28,40	2,00	5,17	35,57	39,2
2	2	50	15	20	35,30	5,70	4,50	1,43	29,60	1,20	3,07	33,87	28,5
2	2	50	15	60	35,30	6,90	4,90	1,49	28,40	2,00	3,41	33,81	38,3
2	2	50	15	100	35,30	8,30	5,00	1,49	27,00	3,30	3,51	33,81	43,3
2	2	50	30	20	36,80	7,20	6,00	1,70	29,60	1,20	4,30	35,10	29
2	2	50	30	60	36,80	8,40	6,40	1,70	28,40	2,00	4,70	35,10	38,5
2	2	50	30	100	36,80	9,80	6,50	1,58	27,00	3,30	4,92	35,22	44
2	2	50	45	20	38,00	8,40	7,20	1,38	29,60	1,20	5,82	36,62	29,3
2	2	50	45	60	38,00	9,60	7,60	1,32	28,40	2,00	6,28	36,68	38,3
2	2	50	45	100	38,00	11,00	7,70	1,30	27,00	3,30	6,40	36,70	44,7

Tableau 3.5 - Corrélation entre les positions de la vis, condition de fabrication, dosage et pression maximale d'injection

Les chiffres gras signifient une corrélation significative.

	Résine	Géo	Tm	Pm	Vinj	S1	S2
Résine	1,00	-0,33	0,00	0,00	0,00	0,16	0,02
Géo	-0,33	1,00	0,00	0,00	0,00	-0,64	-0,18
Tm	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,03	0,03
Pm	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,73	0,72
Vinj	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,64
S1	0,16	-0,64	0,03	0,73	0,00	1,00	0,64
S2	0,02	-0,18	0,03	0,72	0,64	0,64	1,00
S3	0,07	-0,20	0,01	0,95	0,17	0,82	0,85
S4	0,45	-0,56	0,38	-0,23	-0,01	0,09	-0,03
Sv1	0,17	-0,54	0,00	0,00	-0,76	0,42	-0,42
Sv2	-0,06	-0,06	0,05	0,00	0,97	0,04	0,66
Spm	-0,02	-0,09	-0,06	0,97	0,17	0,78	0,83
Dosage	0,09	-0,56	-0,02	0,76	0,00	0,99	0,65
Pinjmax	-0,41	0,30	-0,11	0,03	0,87	-0,17	0,55
	S3	S4	Sv1	Sv2	Spm	Dosage	Pinjmax
Résine	0,07	0,45	0,17	-0,06	-0,02	0,09	-0,41
Géo	-0,20	-0,56	-0,54	-0,06	-0,09	-0,56	0,30
Tm	0,01	0,38	0,00	0,05	-0,06	-0,02	-0,11
Pm	0,95	-0,23	0,00	0,00	0,97	0,76	0,03
Vinj	0,17	-0,01	-0,76	0,97	0,17	0,00	0,87
S1	0,82	0,09	0,42	0,04	0,78	0,99	-0,17
S2	0,85	-0,03	-0,42	0,66	0,83	0,65	0,55
S3	1,00	-0,07	-0,04	0,17	0,98	0,83	0,14
S4	-0,07	1,00	0,14	0,05	-0,26	-0,06	-0,27
Sv1	-0,04	0,14	1,00	-0,74	-0,07	0,40	-0,85
Sv2	0,17	0,05	-0,74	1,00	0,16	0,03	0,83
Spm	0,98	-0,26	-0,07	0,16	1,00	0,82	0,18
Dosage	0,83	-0,06	0,40	0,03	0,82	1,00	-0,13
Pinjmax	0,14	-0,27	-0,85	0,83	0,18	-0,13	1,00

La surface de l'insert qui correspond à celle de l'éprouvette se trouve au fond de la cavité rectangulaire de l'insert. Parce que ce plan est plus bas que le plan de joint, ce dernier est choisi comme le plan de référence pour mesurer l'insert (voir la Figure 3.4). Les points 1, 2 et 3 sont sur le plan de joint. Ces trois points sont d'abord palpés pour définir le plan Z. Ensuite, le palpeur est déplacé dans le trou A. Le centre du trou A est trouvé en palpant quatre endroits sur la paroi intérieure du trou A. De la même façon, le centre du trou B et celui du trou C sont trouvés. La ligne, qui passe par le centre de A et celui de B, et le plan Z définissent le plan Y. Le centre de C et les plans Z et Y définissent le plan X, ainsi le point d'origine est créé. Ce point est situé au centre du

trou B et dans le plan de joint. Sa position et ses directions sont montrées à la Figure 3.4. L'insert est ensuite mesuré en palpant les 75 points dans les 75 carrés. Ce processus est répété trois fois pour chaque profil des trois inserts. Les résultats de mesure de palpé sont montrés à la Figure 3.4 à l'aide du logiciel STATISTICA pour les trois inserts. En analysant ces résultats, on trouve qu'il n'y a pas d'erreur importante. Il n'y a pas de point hors contrôle. Les trois mesures de chaque point d'un profil coïncident. La valeur moyenne des trois mesures est utilisée pour analyser le gauchissement des éprouvettes pour chaque géométrie.

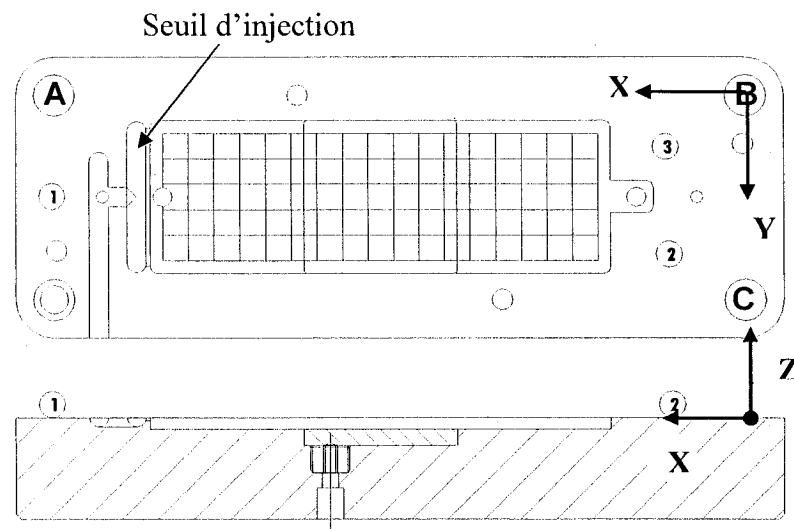


Figure 3.4 - Insert du moule de la partie mobile.

Étant donné que la surface de l'éprouvette et celle de l'insert sont face à face au cours du moulage, et que ces deux surfaces sont installées vers le haut lors des mesures, leurs directions de coordonnées ne sont donc pas identiques. Elles ont la même direction en X, mais une direction opposée en Y et en Z. Par conséquent, il faut transformer les coordonnées de l'insert parce qu'on a choisi d'utiliser le système de référence de l'éprouvette comme système de référence pour cette étude.

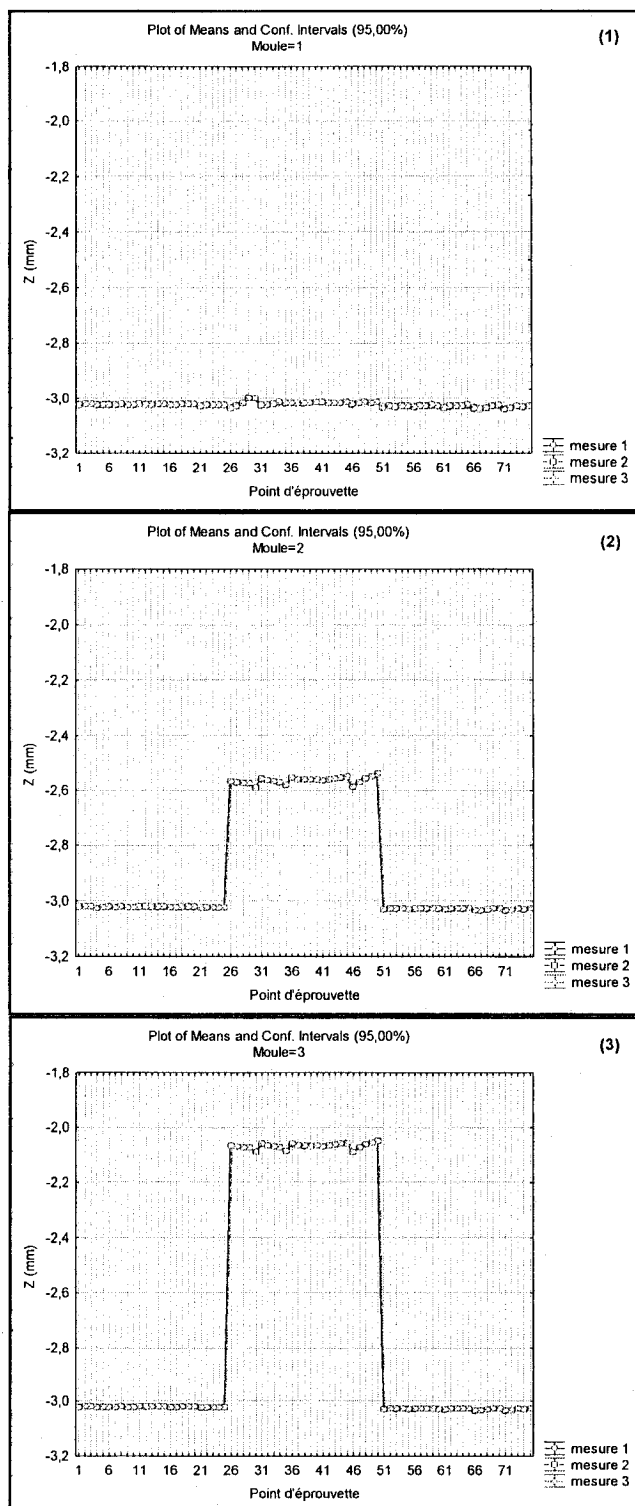


Figure 3.5 - Mesures répétées de chaque insert, (1) épaisseur constante; (2) épaisseur variable et géométrie symétrique; (3) épaisseur variable et géométrie asymétrique.

3.6 Mesure des éprouvettes

Après le moulage de l'éprouvette, les canaux d'alimentation sont coupés et l'éprouvette est posée sur une surface plate afin qu'elle ne subisse pas de déformation supplémentaire. Les éprouvettes sont déposées de manière identique pour éviter d'induire des déformations lors des manipulations. La Figure 3.6 montre comment les éprouvettes sont disposées sur un plan.

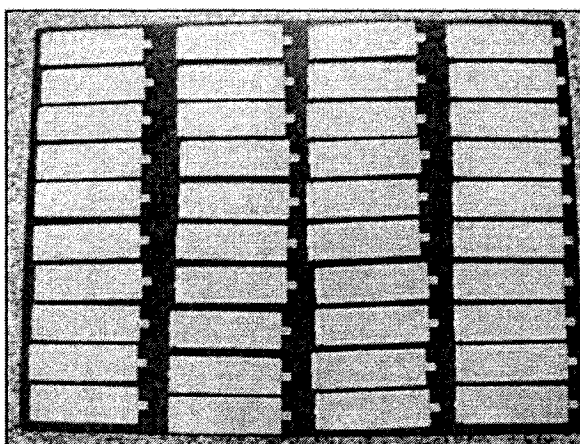


Figure 3.6 - Éprouvettes mises sur une surface plate après avoir été moulées.

Les éprouvettes sont relativement légères et leur surface est déformée. Quand une éprouvette est mise sur le marbre de la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), elle ne peut pas être fixée. Quand le palpeur touche la surface de l'éprouvette, celle-ci bouge. Si l'on fixe l'éprouvette avec un peu plus de force, des déformations supplémentaires seront générées. Afin d'éviter toutes déformations supplémentaires lors des mesures, les éprouvettes sont donc maintenues dans leur forme originale par un bain de plâtre.

La première étape consiste à préparer le coulage du plâtre dans un moule et à disposer les éprouvettes sur la pâte. Les étapes de cette préparation sont les suivantes :

- (1) Un moule pour mesurer les éprouvettes est fabriqué. Pour éviter la corrosion, un film de plastique est déposé sur le moule.
- (2) Une tasse d'eau est versée dans un contenant.
- (3) Deux tasses de plâtre en poudre sont ajoutées dans le contenant.
- (4) La mixture est mélangée avec une tige jusqu'à ce qu'elle soit homogène.
- (5) La mixture est versée dans le moule.
- (6) Le moule est agité par vibrations afin que la mixture soit bien distribuée et qu'elle devienne une pâte. Puis les éprouvettes sont déposées sur la pâte.
- (7) Cinq éprouvettes sur dix sont choisies et déposées délicatement l'une après l'autre sur la pâte. Cette phase doit être réalisée rapidement et précisément afin qu'elle soit terminée avant que la pâte devienne sèche.

Quand une éprouvette est mise sur la pâte, il ne faut pas appuyer sur l'éprouvette et il ne faut donner aucune force à l'éprouvette parce qu'une force peut engendrer une déformation supplémentaire. Il faut seulement placer l'éprouvette sur la pâte et l'appuyer sur trois tiges pour la positionner. Plusieurs minutes sont nécessaires pour que la pâte sèche et que les éprouvettes soient maintenues par la pâte.

La deuxième étape est de calibrer la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT). Ce processus est défini par un programme et se fait automatiquement.

La troisième étape est de déplacer le moule qui possède les cinq éprouvettes bien positionnées. Le moule est placé sur le marbre de la machine et mise en place par quatre morceaux de caoutchouc.

La quatrième étape est de palper les trois points 1, 2 et 3 sur la surface de l'éprouvette pour définir le plan Z. Ensuite, le capteur est déplacé à côté de la tige A. Le centre de la tige A est trouvé en palpant les quatre endroits sur la paroi extérieure de la tige A. De la même manière, le centre de la tige B et celui de la tige C sont trouvés. La ligne, qui

traverse le centre de A et celui de B, et le plan Z définissent le plan Y. Le centre de C et les plans Z et Y définissent le plan X et le point d'origine. Ce point est situé à la croisée de la ligne définie par les points A et B et de la ligne passant par le centre de la tige C et perpendiculaire à la ligne AB. Aussi, ce point est dans le plan Z qui est défini par les points 1, 2 et 3. Sa position et ses directions sont montrées à la Figure 3.7. La direction de Z est perpendiculaire au plan XY.

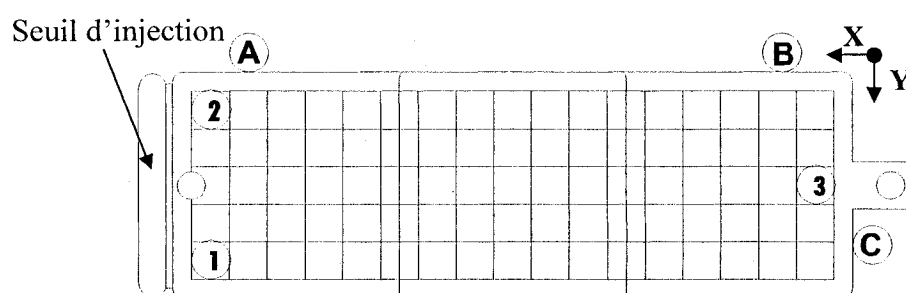


Figure 3.7 - Vue d'une éprouvette et les trois tiges.

La cinquième étape est l'acquisition automatique des 75 mesures. Cette étape est réalisée en palpant automatiquement un point dans chacun des 75 carrés sur la surface de l'éprouvette et en enregistrant leurs coordonnées. La Figure 3.8 montre les 75 points sur la surface d'une éprouvette.

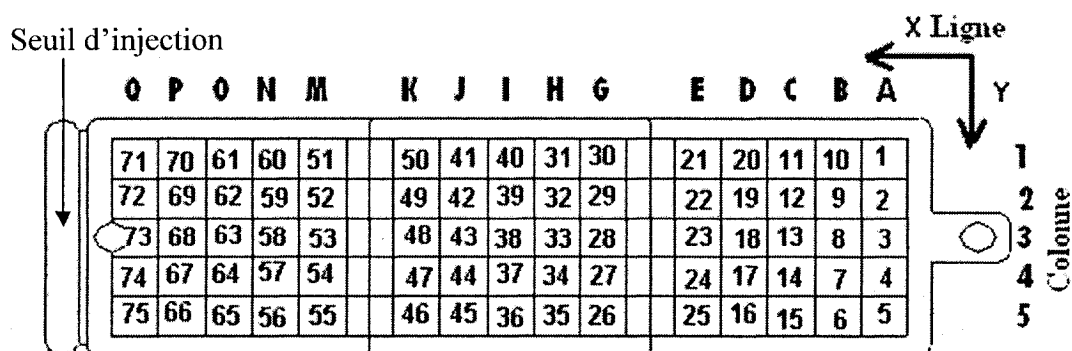


Figure 3.8 - 75 points sur la surface d'une éprouvette.

Ce processus est répété pour mesurer les quatre autres éprouvettes. Ces cinq séries de coordonnées représentent le résultat d'une configuration d'éprouvettes.

Toutes les étapes sont répétées pour mesurer les autres configurations d'éprouvettes.

Le système de mesure comprenant la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) et les cinq éprouvettes est montré à la Figure 3.9.

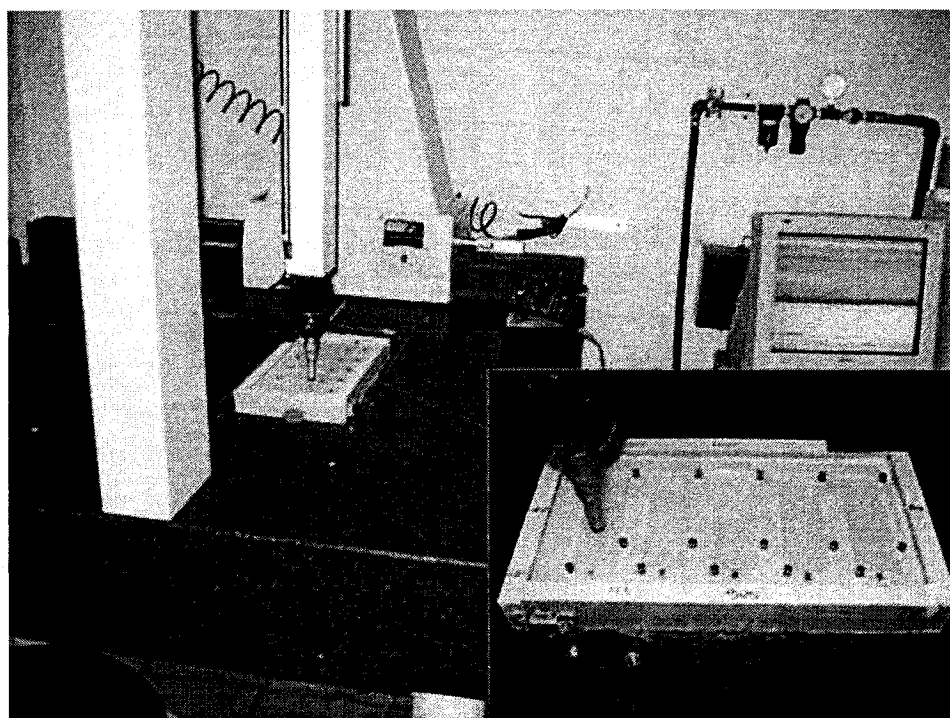


Figure 3.9 - Système de mesure MMT.

3.7 Présentation des mesures d'une éprouvette

Les coordonnées des éprouvettes sont traitées à l'aide du logiciel MATLAB (R2006b). La Figure 3.10 montre la surface d'une éprouvette. Les couleurs montrent les positions des points sur la surface. La couleur plus foncée signifie que le point est plus bas et la couleur plus pâle montre que le point est plus haut. L'unité utilisée est le mm.

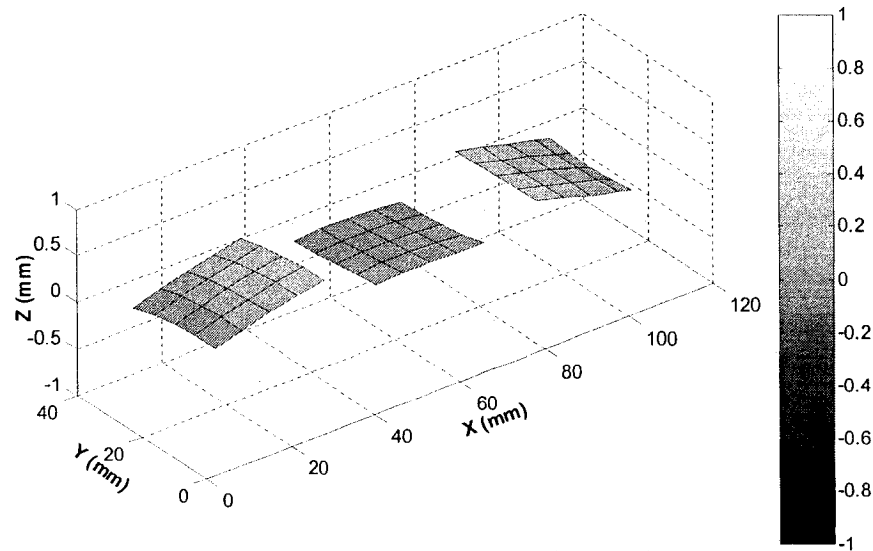


Figure 3.10 - Surface d'une éprouvette : résine HIVAL 2420NA, épaisseur variable et géométrie symétrique, $T_m = 50^\circ\text{C}$, $P_m = 30\text{ MPa}$, $V_{inj} = 60\text{ mm/s}$, les unités sont en mm.

3.8 Présentation des calculs du gauchissement d'une éprouvette

Un exemple de résultat des mesures de gauchissement pour l'éprouvette 2501 (première éprouvette moulée avec résine HIVAL 2420NA, épaisseur variable et de géométrie symétrique, température du moule 50°C , pression de maintien 30 MPa et vitesse d'injection 60 mm/s) est présenté aux Figures 3.11 à 3.13. La Figure 3.11 présente la déformation (0,65388 mm) et l'ondulation de l'éprouvette. La Figure 3.12 montre la distorsion et la flexion de l'éprouvette dans le sens transversal. L'angle de torsion de la ligne A et celui de la ligne I est respectivement de $-0,35^\circ$ et de $-0,25^\circ$. La flexion de la ligne A, I et Q est respectivement de 0,0422 mm, -0,0108 mm et -0,0411 mm. La Figure 3.13 montre la distorsion et la flexion de l'éprouvette dans le sens de l'écoulement. L'angle de torsion de la colonne 1, 3 et 5 est respectivement de $-0,02^\circ$,

$-0,02^\circ$ et $0,07^\circ$. La flexion des colonnes 1, 3 et 5 est respectivement de 0,5150 mm, 0,4881 mm et 0,4814 mm.

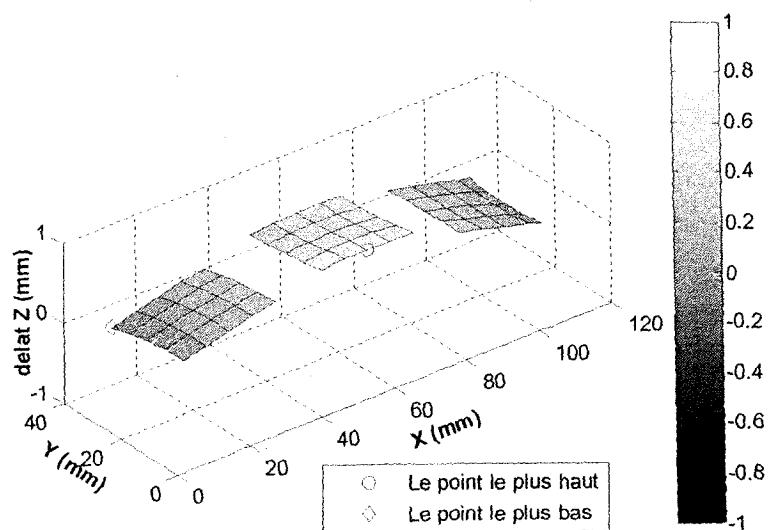


Figure 3.11 - Vue générale de la déformation et de l'ondulation.

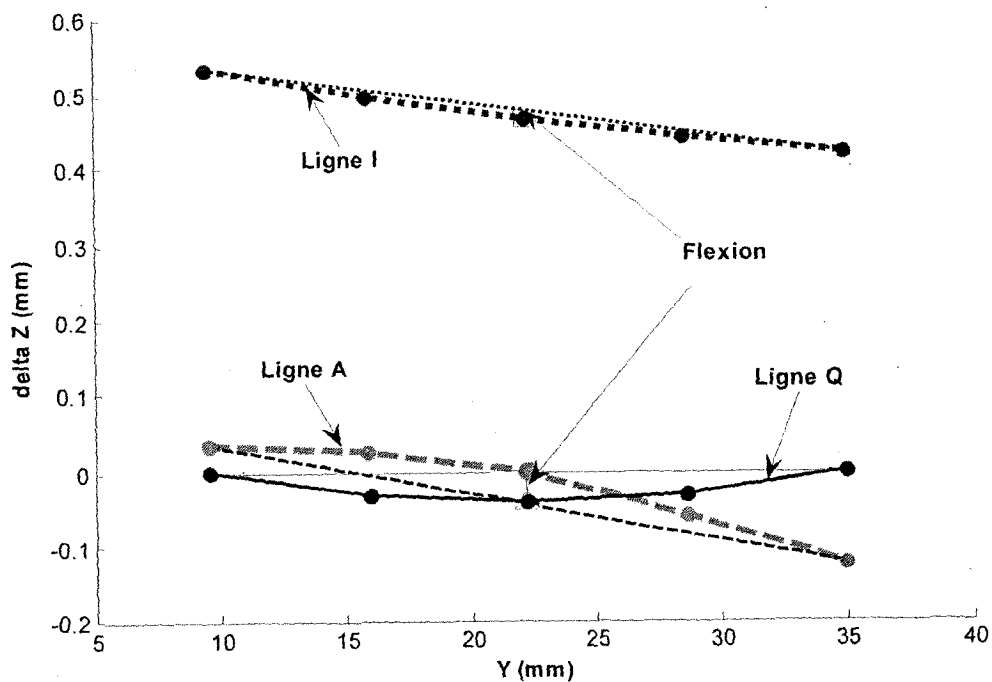


Figure 3.12 - Torsion et flexion dans le sens transversal.

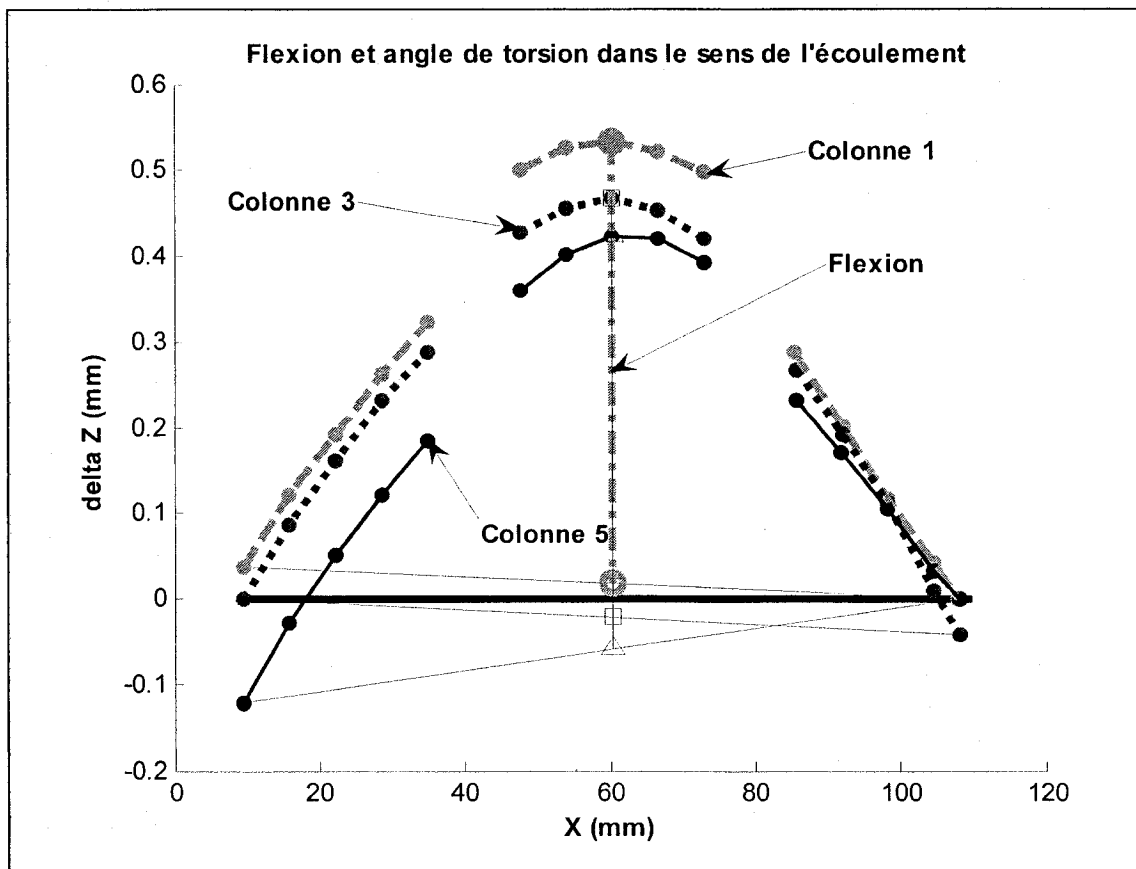


Figure 3.13 - Torsion et flexion dans le sens de l'écoulement.

4 ANALYSE DES RÉSULTATS

Dans ce chapitre, toutes les informations concernant l'analyse des résultats du projet seront présentées à l'aide du logiciel STATISTICA. Les paramètres dépendants et indépendants sont présentés aux Tableaux 2.1 et 3.3. Tous les graphiques sont présentés avec intervalles de confiance de 95 % (les moyennes des cellules sont représentées avec leurs intervalles de confiance de niveau $1-\alpha = 0,95$).

4.1 Influence de la géométrie et de la résine sur le gauchissement

4.1.1 Déformation et angles de torsion d'éprouvette

Les résultats obtenus du logiciel MATLAB (R2006) sont analysés à l'aide du logiciel STATISTICA. Premièrement, l'effet de la résine et de la géométrie est étudié. La Figure 4.1 et le Tableau 4.1 montrent les effets. Le seuil de probabilité est de 0,05.

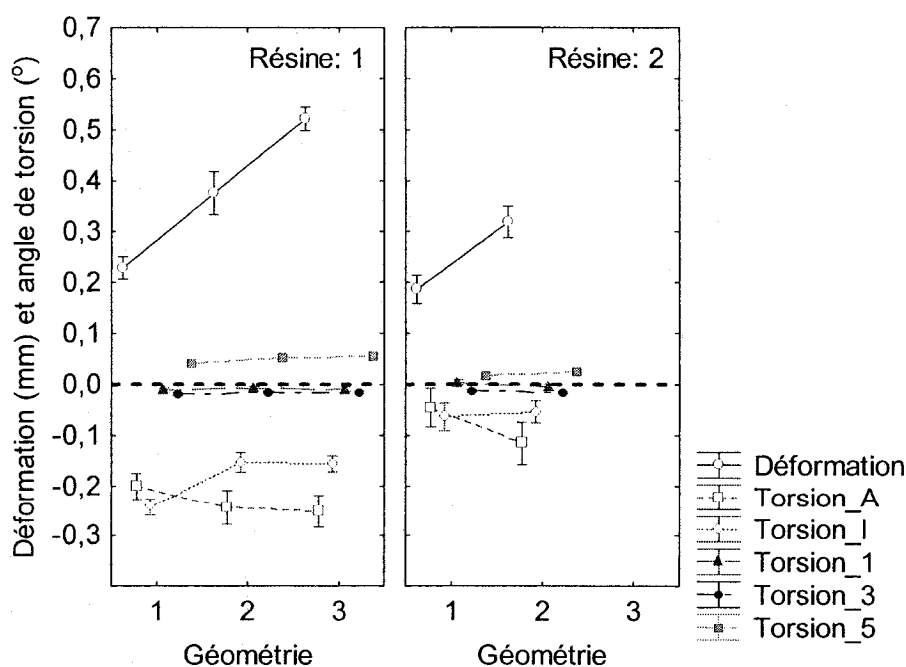


Figure 4.1 - Effets de la résine et de la géométrie sur la déformation totale et les angles de torsion dans les deux sens.

Tableau 4.1 - Valeurs moyennes et écart-types des déformations et des angles de torsion

Variable	Descriptive Statistics (general.sta)									
	Résine 1: HIVAL 2420NA						Résine 2: Pro-fax SG899			
	Géométrie 1		Géométrie 2		Géométrie 3		Géométrie 1		Géométrie 2	
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
Déformaiton	0,2285	0,0789	0,3754	0,1509	0,5217	0,0821	0,1862	0,0982	0,3188	0,1092
Torsion_A	-0,2004	0,0918	-0,2433	0,1221	-0,2506	0,1151	-0,0454	0,1330	-0,1157	0,1475
Torsion_I	-0,2421	0,0582	-0,1521	0,0699	-0,1550	0,0562	-0,0637	0,0965	-0,0531	0,0771
Torsion_1	-0,0112	0,0139	-0,0086	0,0157	-0,0092	0,0141	0,0045	0,0191	-0,0051	0,0236
Torsion_3	-0,0184	0,0080	-0,0151	0,0060	-0,0154	0,0074	-0,0128	0,0089	-0,0165	0,0057
Torsion_5	0,0405	0,0118	0,0541	0,0172	0,0554	0,0187	0,0162	0,0186	0,0248	0,0218

La Figure 4.1 montre que la déformation de gauchissement des éprouvettes dans le sens Z augmente avec le changement de la géométrie pour les deux types de résine. Ceci indique que le changement d'épaisseur influence la déformation d'éprouvette d'une manière proportionnelle. La Figure 4.1 présente aussi que la déformation de la résine 2 est un peu plus petite que celle de la résine 1 pour la même géométrie. L'indice de fluidité de la résine 1 est de 20 g/10min et celui de la résine 2 est de 35 g/10min. Ceci implique que plus l'indice de fluidité de la résine augmente, plus facile est l'écoulement de la résine dans la cavité du moule, moins la déformation générale et la déformation de gauchissement est importante. La raison est qu'avec un indice de fluidité élevé, la surface de la résine subit moins d'effort de cisaillement.

Les angles de torsion latérale (torsion A et torsion I) sont toujours négatifs pour les trois géométries et les deux résines. Cela signifie que, dans le sens Z, le côté de l'insert plus proche du centre du moule est toujours plus haut que l'autre côté. Ce phénomène peut être causé par la distribution différente de la température réelle dans l'insert. En fait, le côté de l'insert qui est plus proche du centre du moule est plus chaud que l'autre côté parce que la carotte d'alimentation du moule se situe au centre entre les deux inserts. C'est à cet endroit que la résine est introduite dans le moule. Le canal de refroidissement à l'eau passe au centre de l'insert. Donc, le centre du moule devait être plus chaud que ses côtés.

La torsion la plus éloignée du seuil, Torsion_A, augmente avec le passage de la géométrie 1 à la géométrie 2 pour les deux résines, ce qui implique que le changement d'épaisseur amène davantage de distorsion à la ligne la plus éloignée du seuil dans le sens transversal de l'écoulement. Cependant, la conclusion est contraire pour la ligne I localisée au centre de l'éprouvette. En fait, avec la géométrie 2, l'épaisseur est plus mince au centre de l'éprouvette et donc cette région se refroidit et se solidifie plus rapidement que les deux extrémités. Avant que cette région ne soit solidifiée, la résine nécessaire pour compenser le vide causé par la solidification de la résine peut être poussée dans cette région au travers de la région proche du seuil. Cependant, la région la plus éloignée du seuil ne peut pas obtenir de la résine après que la région centrale soit solidifiée. La région centrale se solidifie sous une pression de maintien importante, tandis que la région la plus éloignée du seuil se solidifie sous une pression de maintien plus faible.

Pour les trois géométries et les deux résines, les angles de torsion principale sont dix fois plus petits et plus stables que ceux de torsion latérale. Leur valeur est autour de 0 degré. Ce phénomène implique qu'il y a moins de distorsion dans le sens de l'écoulement que dans le sens transversal. Aussi, la variation de la distorsion dans le sens de l'écoulement est plus petite que celle dans le sens transversal. La torsion de la colonne 1 (Torsion_1) est presque de 0 degré. Ceci implique que la colonne 1 de l'éprouvette, la plus proche du centre du moule, ne montre pas de torsion dans le sens de l'écoulement. La Torsion _5 est positive et c'est la torsion la plus élevée des trois torsions dans le sens de l'écoulement. Ceci implique que la colonne 5 de l'éprouvette, qui se situe au plus éloigné du centre du moule, se tord davantage que les autres. Il faut souligner que ce côté est le côté le moins chaud de l'insert du moule. De plus, la valeur positive signifie que sur cette colonne le point le plus éloigné du seuil est toujours localisé en dessous du plan de référence. En regardant la Torsion_3, on voit que cette colonne est stable et que le point le plus proche du seuil est plus bas que le plan de référence.

Dans les deux sens, les angles de torsion de la résine 2 sont plus petits que ceux de la résine 1. Cela peut être expliqué par un meilleur écoulement de la résine 2, qui possède un indice de fluidité plus élevé.

Pour la résine 1, la Figure 4.1 démontre que les géométries 2 et 3 possèdent une distorsion identique dans les deux sens de l'écoulement. Ceci signifie que la géométrie symétrique ou asymétrique n'a pas d'effet sur la distorsion quand les épaisseurs sont identiques.

4.1.2 Flexion de l'éprouvette

La Figure 4.2 et le Tableau 4.2 montrent l'effet de la résine et de la géométrie sur la flexion de l'éprouvette dans le sens de l'écoulement et dans le sens transversal. Le seuil de probabilité est de 0,05.

Pour les trois géométries et les deux résines, les flexions dans le sens de l'écoulement, représentées par Flex_1_max, Flex_3_max et Flex_5_max, sont plus importantes que celles dans le sens transversal, représentées par Flex_A_max, Flex_I_max et Flex_Q_max. Dans les deux sens, les flexions de la résine 2 sont un peu plus petites que celles de la résine 1. Il faut rappeler que l'indice de fluidité de la résine 2 est plus élevé que celui de la résine 1.

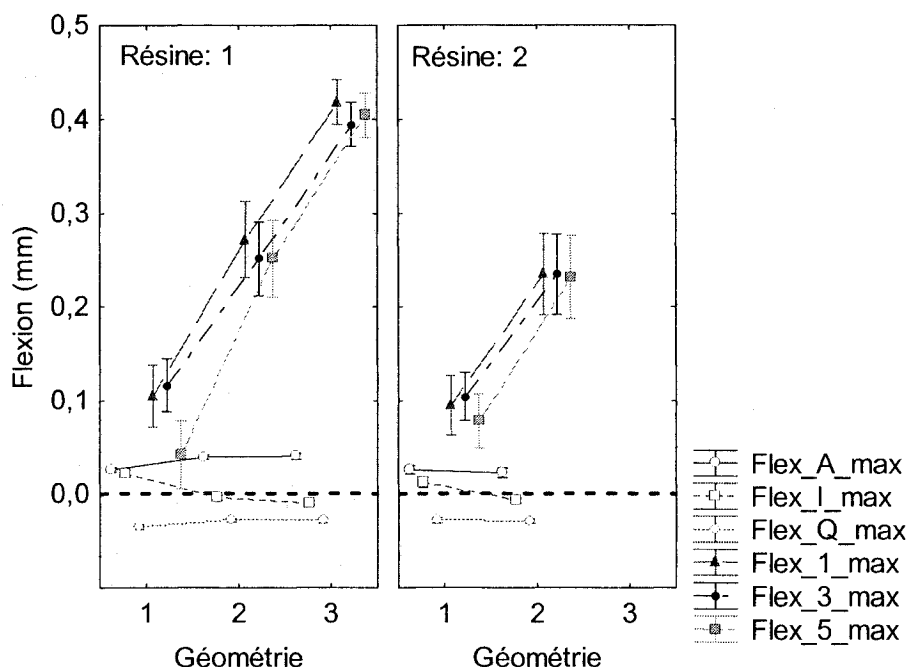


Figure 4.2 - Effets de la résine et de la géométrie sur la flexion dans les deux sens.

Tableau 4.2 - Valeurs moyennes et écart-types des flexions

Variable	Descriptive Statistics (general.sta)									
	Résine1: HIVAL 2420NA						Résine 2: Pro-fax SG899			
	Géométrie 1		Géométrie 2		Géométrie 3		Géométrie 1		Géométrie 2	
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
Flex_A_max	0,0256	0,0083	0,0393	0,0083	0,0401	0,0118	0,0253	0,0154	0,0222	0,0187
Flex_I_max	0,0214	0,0138	-0,0049	0,0097	-0,0095	0,0081	0,0119	0,0191	-0,0076	0,0079
Flex_Q_max	-0,0356	0,0101	-0,0285	0,0075	-0,0286	0,0097	-0,0283	0,0109	-0,0295	0,0081
Flex_1_max	0,1044	0,1169	0,2715	0,1431	0,4182	0,0823	0,0942	0,1116	0,2349	0,1541
Flex_3_max	0,1161	0,0998	0,2510	0,1388	0,3944	0,0822	0,1036	0,0904	0,2348	0,1523
Flex_5_max	0,0420	0,1272	0,2511	0,1459	0,4037	0,0831	0,0781	0,1028	0,2314	0,1567

Dans le sens de l'écoulement, les flexions de l'éprouvette sur les trois colonnes sont toujours positives et augmentent en passant de la géométrie 1 à 3 pour la résine 1 et de la géométrie 1 à 2 pour la résine 2. Les flexions et leurs variations pour les deux résines sont similaires. Pour la géométrie 1, qui est d'épaisseur constante, la valeur de la flexion sur la colonne 3 est la plus élevée ce qui implique que les éprouvettes fléchissent davantage au centre dans le sens de l'écoulement. C'est la région la plus froide du moule parce que le canal du système de refroidissement passe au-dessous de cette colonne. Pour la géométrie 2, qui est d'épaisseur variable et de géométrie symétrique,

les valeurs de flexion pour la résine 2 sur les trois colonnes sont identiques. Cependant, celles de la résine 1 changent de l'une à l'autre et la colonne 1 de l'éprouvette fléchit davantage. Ce phénomène apparaît aussi pour la géométrie 3. La colonne 1 se situe au niveau de la région la plus chaude de l'éprouvette.

Dans le sens transversal, les flexions de la résine 1 sont plus importantes que celles de la résine 2. Les flexions sur la ligne I sont les plus petites des trois lignes. Si la géométrie change, l'épaisseur au centre de l'éprouvette change et donc la flexion change. Pour les géométries 2 et 3 de la résine 1, les flexions ne varient pas. Ceci implique que les flexions changent avec le changement d'épaisseur de l'éprouvette mais restent constantes que la géométrie soit symétrique ou asymétrique.

La Figure 4.2 montre que les flexions sur la ligne I sont plus petites pour les trois géométries et les deux résines, ce qui implique que l'éprouvette fléchit moins au centre dans le sens transversal de l'écoulement. Avec une épaisseur de cette région moindre, cet état serait encore amélioré. Ceci peut être dû à la solidification plus rapide de la résine dans cette région par rapport aux deux extrémités.

La Figure 4.2 montre aussi que les flexions sont toujours négatives sur la ligne Q, ce qui implique que la ligne Q fléchit vers le bas. Autrement dit, l'éprouvette fléchit vers le bas dans le sens transversal près du seuil. Plus éloigné du seuil, c'est le contraire qui est observé.

La Figure 4.2 indique que la variation des flexions dans le sens de l'écoulement est plus importante que celle dans le sens transversal à l'écoulement, soit entre 0,0822 et 0,1567 et entre 0,0075 et 0,0187.

4.1.3 Analyse ANOVA

Le Tableau 4.3 présente les résultats de l'analyse ANOVA (analyse de la variance). Lorsque la valeur de probabilité (p) est inférieure à 5 %, l'influence est significative. Cette analyse sert à expliquer si les variables indépendantes, soit la résine ou la géométrie, ont un effet significatif sur la variabilité des paramètres de gauchissement. Les résultats indiquent globalement que les variables Résine, Géométrie et leur combinaison ont un effet significatif sur le gauchissement.

Tableau 4.3 - Effet de la résine et de la configuration géométrique sur le gauchissement

Effect	Multivariate Tests of Significance (general.sta) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition Exclude condition: Géométrie=3					
	Test	Value	F	Effect df	Error df	p
Intercept	Wilks	0,014216	1069,034	12	185	0,000000
Résine	Wilks	0,331390	31,105	12	185	0,000000
Géométrie	Wilks	0,254416	45,180	12	185	0,000000
Résine*Géométrie	Wilks	0,658818	7,984	12	185	0,000000

Les résultats de l'analyse ANOVA sur chaque paramètre du gauchissement sont montrés au Tableau 4.4. On voit bien que la résine et la géométrie ont l'effet sur la déformation, la torsion et la flexion dans le sens transversal. Dans le sens de l'écoulement, la résine a un effet sur la torsion et la géométrie a un effet sur la flexion. Les chiffres en gras signifient que leurs effets sont significatifs.

Tableau 4.4 - Effet de la résine et de la géométrie sur chaque paramètre du gauchissement

Univariate Tests of Significance for : chaque paramètre de gauchissement Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition Exclude condition: Géométrie 3						
	Valeur p					
	Déformation	Torsion_A	Torsion_I	Torsion_1	Torsion_3	Torsion_5
Intercept	0,000000	0,000000	0,000000	0,000138	0,000000	0,000000
Résine	0,002141	0,000000	0,000000	0,000298	0,036682	0,000000
Géométrie	0,000000	0,001620	0,000006	0,184899	0,846760	0,000015
	Flexion_A	Flexion_I	Flexion_Q	Flexion_1	Flexion_3	Flexion_5
Intercept	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Résine	0,000009	0,001449	0,017594	0,213381	0,410259	0,668538
Géométrie	0,006108	0,000000	0,024199	0,000000	0,000000	0,000000

4.1.4 Synthèse des effets de la résine et de la géométrie

En conclusion, l'indice de fluidité élevé de la résine provoque moins de distorsion et de flexion dans les deux sens de l'écoulement. Le changement d'épaisseur de l'éprouvette provoque un changement de distorsion et de flexion. Mais la géométrie symétrique ou asymétrique n'influence pas la distorsion, ni la flexion quand l'épaisseur de l'éprouvette ne varie pas.

4.2 Influence des paramètres de fabrication sur le gauchissement de l'éprouvette

Une presse à injection possède un grand nombre de paramètres de réglage (plus d'une quarantaine). Dans ce travail, basé sur l'étude bibliographique présentée au chapitre 3, les trois paramètres les plus souvent cités ont été choisis pour être analysés. Ce sont la température du moule, la vitesse d'injection et la pression de maintien. Premièrement, on analyse l'influence de la température du moule sur le gauchissement des éprouvettes.

4.2.1 Influence de la température du moule sur le gauchissement de l'éprouvette

Dans la section précédente, l'influence de la résine sur le gauchissement a été analysée. Étant donné que la résine a un effet sur le gauchissement, il faut traiter séparément les résines pour analyser l'influence de la température.

4.2.1.1 Résine polypropylène HIVAL 2420NA

1) Effet de la température du moule sur la déformation et la torsion de l'éprouvette

Pour la résine HIVAL 2420NA, l'effet de la température du moule sur la déformation et la distorsion de l'éprouvette est montré à la Figure 4.3 et au Tableau 4.5.

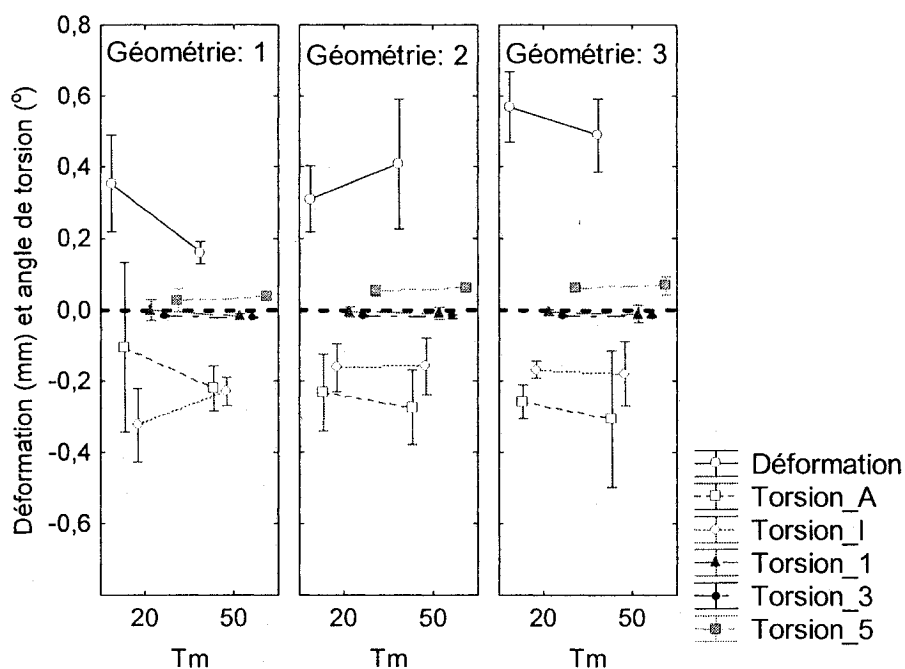


Figure 4.3 - Influence de la température du moule sur la déformation et la torsion des éprouvettes

La Figure 4.3 montre que la déformation de l'éprouvette varie avec la température du moule. La géométrie a aussi un effet sur ce changement. Pour les géométries 1 et 3,

(géométrie avec une épaisseur constante et géométrie asymétrique à épaisseur variable), l'influence de la température du moule sur la déformation et la torsion est similaire. La déformation due au gauchissement de l'éprouvette diminue avec l'augmentation de la température du moule. Quant à la géométrie 2 (géométrie symétrique à épaisseur variable), cette tendance est opposée. La raison qui provoque cette tendance est inconnue.

Tableau 4.5 - Valeurs moyennes et écart-type de la déformation et des angles de torsion

Variable	Descriptive Statistics (general.sta) Résine 1 : HIVAL 2420NA											
	Tm = 20°C						Tm = 50 °C					
	Géométrie 1		Géométrie 2		Géométrie 3		Géométrie 1		Géométrie 2		Géométrie 3	
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
Déformation	0,3539	0,1091	0,3115	0,0746	0,5697	0,0809	0,1621	0,0252	0,4094	0,1467	0,4898	0,0827
Torsion_A	-0,1043	0,1920	-0,2311	0,0872	-0,2577	0,0382	-0,2198	0,0508	-0,2728	0,0844	-0,3059	0,1544
Torsion_I	-0,3235	0,0833	-0,1617	0,0544	-0,1667	0,0191	-0,2282	0,0317	-0,1571	0,0646	-0,1784	0,0728
Torsion_1	0,0020	0,0242	-0,0046	0,0113	-0,0055	0,0056	-0,0174	0,0066	-0,0084	0,0133	-0,0098	0,0195
Torsion_3	-0,0154	0,0021	-0,0147	0,0018	-0,0153	0,0021	-0,0194	0,0013	-0,0170	0,0040	-0,0172	0,0017
Torsion_5	0,0289	0,0256	0,0549	0,0113	0,0609	0,0048	0,0393	0,0065	0,0619	0,0086	0,0690	0,0205

Dans le sens de l'écoulement, les angles de torsion des éprouvettes restent presque constants avec l'augmentation de la température du moule. Ceci implique que la température du moule n'influence pas la distorsion dans le sens de l'écoulement. La torsion de la colonne 1 et de la colonne 3 varie entre $0,0020 \pm 0,0242$ et $0,0194 \pm 0,0013$ degré. Ceci signifie que dans le sens de l'écoulement, le côté de l'éprouvette le plus chaud ne montre presque aucune torsion. La torsion de la colonne 5 est toujours positive et augmente légèrement quand la géométrie change de 1 à 3. Ceci implique que le point le plus éloigné du seuil sur cette colonne est en dessous du plan de référence. Le changement d'épaisseur influence aussi la valeur de la torsion sur la colonne 5. Pour les deux colonnes 1 et 3, la géométrie de l'éprouvette n'influence pas les torsions dans le sens de l'écoulement.

Dans le sens transversal à l'écoulement, les angles de torsion sont tous négatifs pour les trois géométries et les deux températures. Ceci implique que, sur les lignes A et I, le côté le plus chaud de l'éprouvette se déplace vers le haut et l'autre côté se déplace vers

le bas par rapport au plan de référence. La Figure 4.3 montre aussi que, sur la ligne A, l'augmentation de la température du moule hausse les angles de torsion. Ceci implique qu'une basse température diminue la torsion de l'éprouvette au éloigné du seuil d'injection. Quant à la ligne I, l'influence de la température est peu claire. Pour la géométrie 1, l'augmentation de la température diminue la torsion. Pour les deux autres géométries (2 et 3), la température n'a pas d'effet. Pour les deux températures, sur la ligne A, le changement de la géométrie développe la distorsion. Sur la ligne I, le changement de la géométrie diminue sa distorsion. Sur les deux lignes, il n'y a pas de modification de distorsion pour les deux géométries 2 et 3. Ceci implique que l'épaisseur de l'éprouvette influence la distorsion, mais une géométrie symétrique ou asymétrique n'influence pas les résultats.

2) Effet de la température du moule sur la flexion de l'éprouvette

Pour la résine HIVAL 2420NA, l'influence de la température du moule sur la flexion de l'éprouvette est montrée à la Figure 4.4 et au Tableau 4.6.

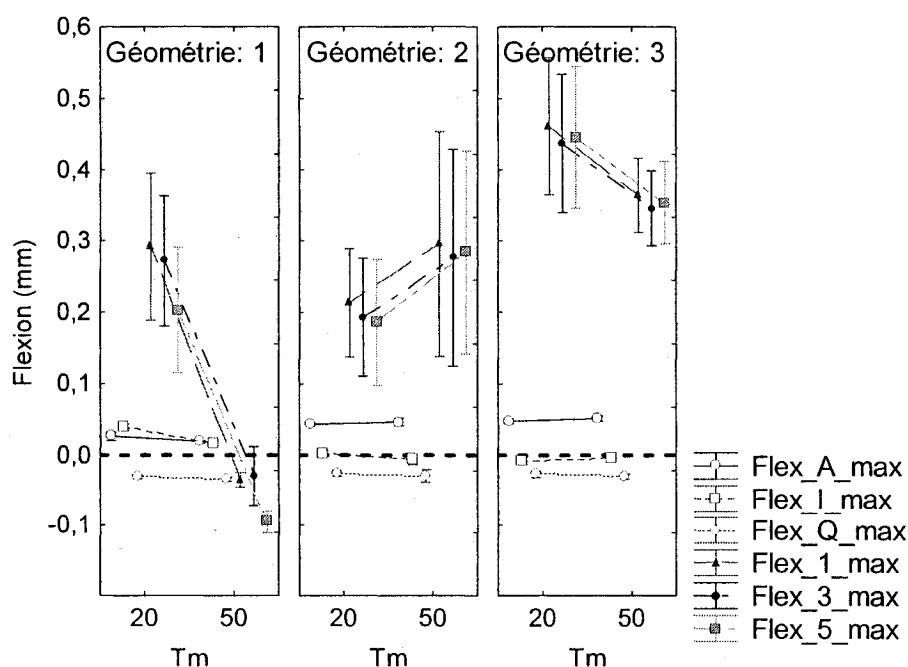


Figure 4.4 - Influence de la température du moule sur la flexion de l'éprouvette, résine HIVAL 2420NA.

Tableau 4.6 - Valeurs moyennes et écart-types des flexions, résine HIVAL 2420NA

Variable	Descriptive Statistics (general.sta) Résine 1: HIVAL 2420NA											
	Tm 1 = 20 °C						Tm 2 = 50 °C					
	Géométrie 1		Géométrie 2		Géométrie 3		Géométrie 1		Géométrie 2		Géométrie 3	
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
Flex_A_max	0,0266	0,0047	0,0433	0,0020	0,0478	0,0029	0,0189	0,0014	0,0460	0,0044	0,0510	0,0031
Flex_I_max	0,0390	0,0036	0,0021	0,0029	-0,0073	0,0035	0,0165	0,0020	-0,0061	0,0058	-0,0048	0,0001
Flex_Q_max	-0,0297	0,0021	-0,0254	0,0031	-0,0264	0,0037	-0,0334	0,0023	-0,0292	0,0068	-0,0296	0,0028
Flex_1_max	0,2922	0,0833	0,2130	0,0609	0,4611	0,0773	-0,0349	0,0081	0,2957	0,1273	0,3644	0,0421
Flex_3_max	0,2719	0,0734	0,1931	0,0664	0,4368	0,0779	-0,0297	0,0332	0,2763	0,1227	0,3457	0,0426
Flex_5_max	0,2029	0,0708	0,1856	0,0708	0,4450	0,0804	-0,0950	0,0130	0,2838	0,1152	0,3538	0,0470

Les flexions et les variations des trois colonnes sont plus importantes que celles des trois lignes. Ceci implique que les éprouvettes fléchissent davantage dans le sens de l'écoulement que dans le sens transversal.

Dans le sens de l'écoulement, les tendances observées pour les flexions ressemblent à celles observées pour les déformations à la Figure 4.3. Pour les deux géométries 1 et 3, les flexions diminuent avec l'augmentation de la température du moule. C'est le contraire pour la géométrie 2. Ce qui provoque ce phénomène est peu clair. La Figure 4.4 montre aussi qu'à la température 50°C, les flexions augmentent quand la géométrie change. Ceci implique que la diminution d'épaisseur au centre de l'éprouvette développe les flexions sur les trois colonnes, peu importe où se situe la colonne. La géométrie asymétrique cause davantage de flexion. À la température 20°C, la géométrie 2 provoque moins de flexion sur les trois colonnes.

Dans le sens transversal, les flexions sur les trois lignes restent presque constantes avec l'augmentation de la température du moule pour les trois géométries. Pour la géométrie 2 et la géométrie 3, les flexions sont identiques. Le changement d'épaisseur a un effet sur les flexions, mais la géométrie symétrique ou asymétrique n'a pas d'effet. Au centre de l'éprouvette dans le sens transversal (ligne I), les flexions sont de 0,0021 à 0,0073 mm, soient les plus petites. C'est la région qui se solidifie le plus rapidement dans l'éprouvette. Les flexions à l'extrémité le plus éloignée du seuil d'injection (ligne A), sont les plus grandes. C'est la région la moins chaude pendant le remplissage de

l'éprouvette. Le côté plus près du seuil (ligne Q) fléchit toujours vers le bas, tandis que le côté le plus éloigné du seuil (ligne A) fléchit vers le haut.

Pour les deux températures du moule, la géométrie joue un rôle. À l'extrémité le plus éloignée du seuil (ligne A), les flexions se développent légèrement en changeant la géométrie. C'est le cas contraire pour le centre de l'éprouvette (ligne I). À l'extrémité le plus près du seuil (ligne Q), rien ne change, ce qui peut s'expliquer par sa position plus proche du seuil. Cette région est plus stable même si la géométrie de l'éprouvette ou la température du moule change.

4.2.1.2 Résine polypropylène Pro-fax SG899

1) Effet de la température du moule sur la déformation et la torsion de l'éprouvette

Pour la résine Pro-fax SG899, l'influence de la température du moule sur la déformation et la torsion de l'éprouvette est montrée à la Figure 4.5 et au Tableau 4.7.

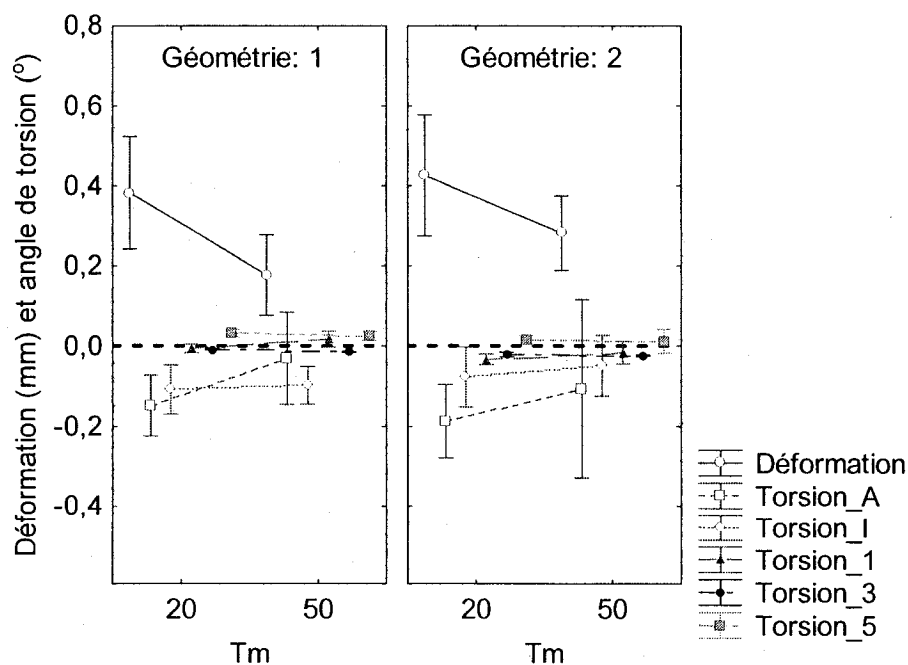


Figure 4.5 - Influence de la température sur la déformation et la torsion de l'éprouvette, résine Pro-fax SG899.

Tableau 4.7 - Valeurs moyennes et écart-types des déformations et des angles de torsion, résine Pro-fax SG899

Variable	Descriptive Statistics (general.sta) Résine 2: Pro-fax SG899							
	Tm = 20 °C				Tm = 50 °C			
	Géométrie 1		Géométrie 2		Géométrie 1		Géométrie 2	
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
Déformation	0,3829	0,1138	0,4258	0,1224	0,1768	0,0809	0,2818	0,0753
Torsion_A	-0,1480	0,0614	-0,1877	0,0741	-0,0306	0,0923	-0,1062	0,1794
Torsion_I	-0,1082	0,0494	-0,0776	0,0602	-0,0980	0,0375	-0,0486	0,0609
Torsion_1	-0,0059	0,0089	-0,0327	0,0109	0,0170	0,0163	-0,0154	0,0226
Torsion_3	-0,0087	0,0012	-0,0206	0,0044	-0,0148	0,0011	-0,0233	0,0014
Torsion_5	0,0323	0,0075	0,0157	0,0085	0,0249	0,0087	0,0121	0,0238

La déformation du gauchissement diminue avec l'augmentation de la température du moule pour les deux géométries. Quand la température est constante, le changement d'épaisseur au centre de l'éprouvette augmente légèrement la déformation du gauchissement de l'éprouvette.

Les angles de torsion et leurs variations dans le sens de l'écoulement sont au moins deux fois plus petits que ceux dans le sens transversal. Dans le sens de l'écoulement, ils varient entre 0,0059 et 0,0327 degré pour les deux températures et les deux géométries. Ni la température, ni la géométrie n'influencent les distorsions dans le sens de l'écoulement. Dans le sens transversal, les distorsions sont toujours négatives. Ceci signifie que le côté de l'éprouvette qui est le plus proche du centre du moule, le plus chaud, est plus haut que l'autre côté. L'augmentation de la température diminue la distorsion de l'éprouvette dans le sens transversal pour les deux géométries. Quand la température est constante, la torsion, du côté opposé au seuil (ligne A), augmente avec le changement de la géométrie. Au centre de l'éprouvette (ligne I), c'est le contraire. Ceci confirme encore que la diminution de l'épaisseur au centre de l'éprouvette cause davantage de torsion à la région suivante, qui est opposée au seuil. Une région centrale mince empêche la résine de traverser cette région pendant le temps de maintien.

2) Effet de la température du moule sur la flexion de l'éprouvette

Pour la résine Pro-fax SG899, l'influence de la température du moule sur la flexion de l'éprouvette est montrée à la Figure 4.6 et au Tableau 4.8.

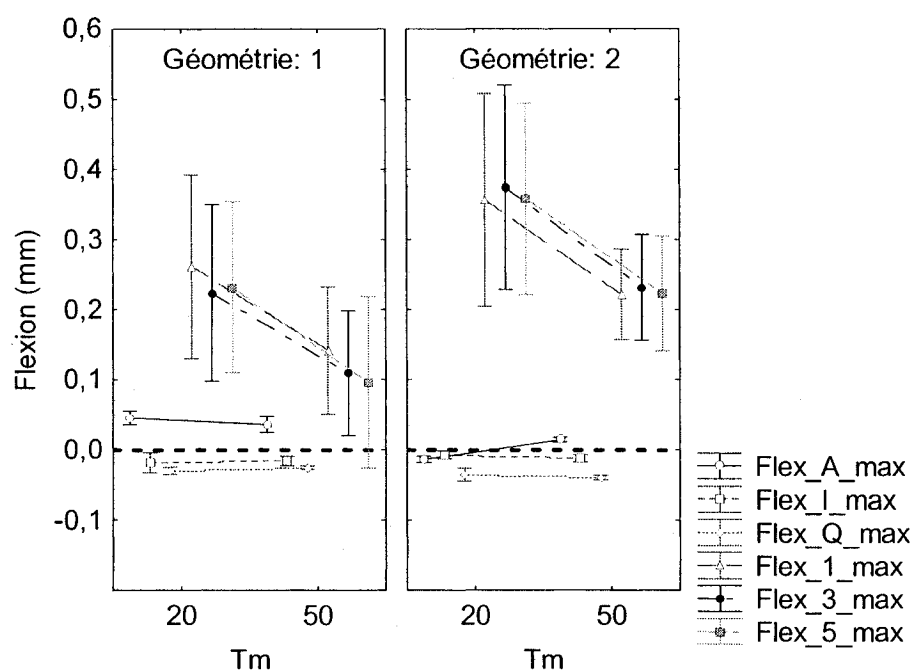


Figure 4.6 - Influence de la température sur la flexion de l'éprouvette, résine Pro-fax SG899.

Tableau 4.8 - Valeur moyennes et écart-types des flexions, résine Pro-fax SG899

Variable	Descriptive Statistics (general.sta) Résine 2: Pro-fax SG899							
	Tm = 20 °C				Tm = 50 °C			
	Géométrie 1		Géométrie 2		Géométrie 1		Géométrie 2	
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
Flex_A_max	0,0456	0,0079	-0,0146	0,0037	0,0361	0,0093	0,0145	0,0026
Flex_I_max	-0,0181	0,0114	-0,0080	0,0045	-0,0164	0,0055	-0,0124	0,0041
Flex_Q_max	-0,0299	0,0042	-0,0355	0,0075	-0,0255	0,0019	-0,0400	0,0024
Flex_1_max	0,2613	0,1057	0,3564	0,1221	0,1418	0,0733	0,2213	0,0520
Flex_3_max	0,2236	0,1015	0,3748	0,1173	0,1087	0,0717	0,2316	0,0610
Flex_5_max	0,2319	0,0981	0,3577	0,1099	0,0959	0,0985	0,2228	0,0658

Comme pour la résine HIVAL 2420NA, les flexions et leurs variations dans les trois colonnes sont dix fois plus grandes que celles des trois lignes. Ceci implique que les

épreuves fléchissent davantage dans le sens de l'écoulement que dans le sens transversal à l'écoulement.

Dans le sens de l'écoulement, les flexions sont toutes positives. Ceci signifie que les épreuves bombent vers le haut. Les flexions diminuent avec l'augmentation de la température du moule. Quand la température est constante, les flexions se développent davantage avec le changement de la géométrie. Le changement d'épaisseur de l'épreuve provoque des flexions supérieures sur les trois colonnes de l'épreuve dans le sens de l'écoulement.

Dans le sens transversal à l'écoulement, au centre de l'épreuve (ligne I), les flexions varient entre 0,0080 et 0,0181 mm pour les deux températures et les deux géométries. Les flexions près du seuil (ligne Q) sont toujours négatives. Ceci implique que l'épreuve fléchit vers le bas au côté plus proche du seuil. Quand la température est constante, les flexions, sur la ligne A et la ligne I diminuent avec le changement de la géométrie. Ceci signifie que la diminution d'épaisseur au centre de l'épreuve diminue les flexions d'épreuve au centre et au plus éloigné du seuil.

4.2.1.3 Analyse ANOVA

L'analyse ANOVA sert à montrer, pour les deux résines, si les variables indépendantes (température du moule et géométrie de l'épreuve) ont un effet significatif sur la variabilité des paramètres de gauchissement. Les résultats généraux de cette analyse sont montrés aux Tableaux 4.9 et 4.10. Les résultats indiquent que les variables température et géométrie ont un effet sur le gauchissement pour les deux types de résine. Quand la valeur p est inférieure à 5 %, l'effet est significatif. L'effet sur chaque paramètre est montré aux Tableaux A6 et A7 de l'Annexe 4. On voit que la géométrie a un effet sur la déformation pour la résine 1 (HIVAL 2420NA), mais la température du moule a un effet sur celle de la résine 2 (Pro-fax SG899).

Tableau 4.9 - Analyse de la variance pour tous les paramètres du gauchissement pour la résine HIVAL 2420NA

Effect	Multivariate Tests of Significance (general.sta) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition Include condition: Résine=1: HIVAL 2420NA, Pm=30 MPa, Vinj=60 mm/s					
	Test	Value	F	Effect df	Error df	p
Intercept	Wilks	0,000000	1,232417E+19	10	15	0,00000
Géométrie	Wilks	0,000000	2,997041E+09	20	30	0,00000
Tm	Wilks	0,000000	8,520288E+17	10	15	0,00000
Géométrie*Tm	Wilks	0,000000	2,068566E+09	20	30	0,00000

Tableau 4.10 - Analyse de la variance pour tous les paramètres du gauchissement pour la résine Pro-fax SG899

Effect	Multivariate Tests of Significance (general.sta) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition Include condition: Résine 2: Pro-fax SG899, Pm=30 MPa, Vinj=60 mm/s					
	Test	Value	F	Effect df	Error df	p
Intercept	Wilks	0,000000	7,540044E+10	11	6	0,00000
Géométrie	Wilks	0,000000	1,920639E+10	11	6	0,00000
Tm	Wilks	0,000000	1,228969E+10	11	6	0,00000
Géométrie*Tm	Wilks	0,000000	5,107464E+10	11	6	0,00000

4.2.1.4 Synthèse des effets de la température

En conclusion, l'augmentation de la température du moule diminue la déformation du gauchissement des éprouvettes pour les deux résines et les trois géométries. Le changement de la géométrie hausse la déformation du gauchissement.

Les angles de torsion dans le sens de l'écoulement et leurs variances sont plus petits que ceux dans le sens transversal. Les angles de torsion dans le sens transversal sont toujours négatifs. Le côté des éprouvettes le plus près du centre du moule est plus haut que l'autre côté. La torsion augmente au fur et à mesure qu'on s'éloigne du seuil d'injection. Pour la résine 1, l'augmentation de la température fait croître la torsion à

l'opposé du seuil d'injection de l'éprouvette, sur la ligne A. C'est le contraire pour la résine 2. Le changement d'épaisseur augmente la torsion à l'opposé du seuil (ligne A), mais diminue celle au centre de l'éprouvette (ligne I).

Les flexions dans le sens de l'écoulement et leurs variances sont plus grandes que celles dans le sens transversal. Dans le sens de l'écoulement, l'augmentation de la température diminue les flexions (sauf géométrie 2 de la résine 1). Ni la température, ni la géométrie n'influence les flexions près du seuil d'injection (ligne Q).

4.2.2 Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur le gauchissement de l'éprouvette

Comme l'analyse de l'influence de la température du moule sur le gauchissement de l'éprouvette dans la section précédente, dans cette section, l'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sera analysée séparément pour les deux résines à l'aide du logiciel STATISTICA.

4.2.2.1 Résine polypropylène HIVAL 2420NA

1) Effet de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la déformation des éprouvettes

Pour les éprouvettes avec épaisseur constante (géométrie 1), épaisseur variable symétrique (géométrie 2) ou asymétrique (géométrie 3), l'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la déformation des éprouvettes sont montrées à la Figure 4.7. Les valeurs moyennes de déformation sont montrées au Tableau 4.11.

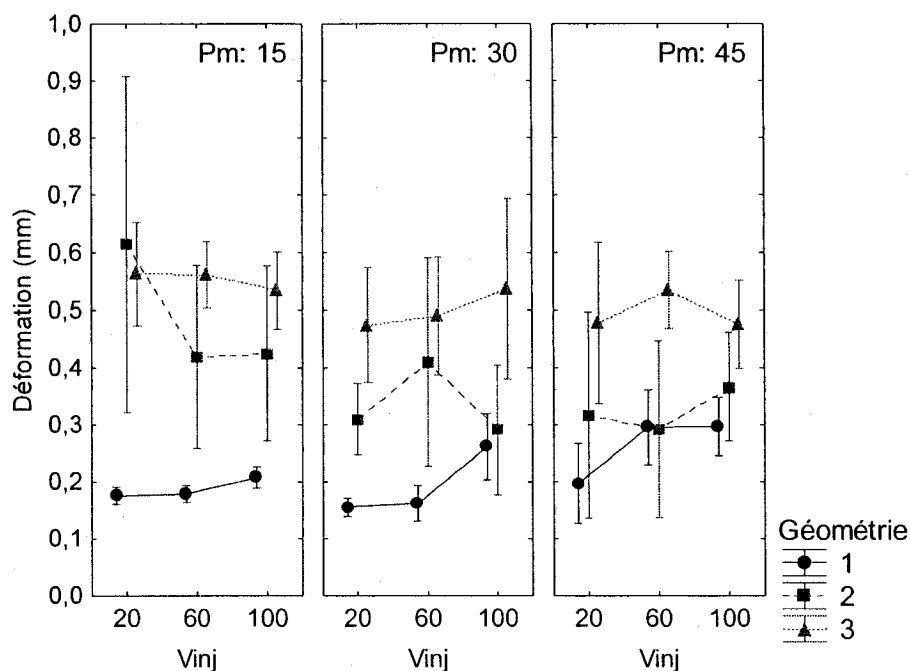


Figure 4.7 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la déformation des éprouvettes : 1 épaisseur constante; 2 épaisseur variable et géométrie symétrique; 3 épaisseur variable et géométrie asymétrique, résine HIVAL 2420NA, à 50°C.

La Figure 4.7 et le Tableau 4.11 montrent clairement que les déformations de la géométrie 3 (épaisseur variable et géométrie asymétrique) sont plus grandes que celles de la géométrie 1 (épaisseur constante d'éprouvette) et de la géométrie 2 (épaisseur variable et géométrie symétrique). Ceci implique qu'une épaisseur constante de l'éprouvette engendre des déformations des éprouvettes plus faibles.

Tableau 4.11 - Valeurs moyennes des déformations pour la résine HIVAL 2420NA

Géométrie*Pm*Vinj; LS Means Déformation (general.sta) Current effect: F(8, 108)=1,7602, p=,09289 Effective hypothesis decomposition Include condition: Résine 1: HIVAL 2420NA and Tm=50							
Cell No.	Géométrie	Pm	Vinj	Mean	-95,00%	95,00%	N
1	1	1	1	0,1757	0,0934	0,2580	5
2	1	1	2	0,1789	0,0965	0,2612	5
3	1	1	3	0,2075	0,1252	0,2898	5
4	1	2	1	0,1557	0,0733	0,2380	5
5	1	2	2	0,1621	0,0798	0,2444	5
6	1	2	3	0,2615	0,1792	0,3438	5
7	1	3	1	0,1969	0,1146	0,2792	5
8	1	3	2	0,2961	0,2137	0,3784	5
9	1	3	3	0,2970	0,2146	0,3793	5
10	2	1	1	0,6153	0,5330	0,6976	5
11	2	1	2	0,4180	0,3357	0,5003	5
12	2	1	3	0,4238	0,3415	0,5062	5
13	2	2	1	0,3099	0,2275	0,3922	5
14	2	2	2	0,4094	0,3271	0,4917	5
15	2	2	3	0,2907	0,2084	0,3730	5
16	2	3	1	0,3166	0,2343	0,3990	5
17	2	3	2	0,2920	0,2097	0,3743	5
18	2	3	3	0,3665	0,2842	0,4489	5
19	3	1	1	0,5632	0,4809	0,6455	5
20	3	1	2	0,5618	0,4795	0,6441	5
21	3	1	3	0,5340	0,4517	0,6163	5
22	3	2	1	0,4739	0,3916	0,5562	5
23	3	2	2	0,4898	0,4075	0,5721	5
24	3	2	3	0,5364	0,4541	0,6188	5
25	3	3	1	0,4777	0,3954	0,5600	5
26	3	3	2	0,5351	0,4528	0,6174	5
27	3	3	3	0,4753	0,3929	0,5576	5

Pour la géométrie 1, quand la pression de maintien reste constante, la déformation augmente avec l'augmentation de la vitesse d'injection. Quand la pression est faible, cette augmentation est légère. Quand la pression est élevée, l'augmentation est aussi élevée. La plus petite déformation se trouve à la pression modérée et la faible vitesse d'injection (30 MPa et 20 mm/s). Sa variance est aussi petite. Ceci signifie qu'avec cette condition de fabrication, les éprouvettes se déforment moins. De plus, la résine se distribue plus uniformément dans la cavité. La plus grande déformation se trouve à une

pression et une vitesse élevées (45 MPa et 100 mm/s). Sous cette condition de fabrication, la résine est injectée dans la cavité à haute vitesse durant la phase d'injection et poussée dans la cavité avec une pression élevée durant la phase de pression de maintien. Ceci peut causer une distribution non uniforme de la résine dans la cavité et de fortes contraintes résiduelles dans l'éprouvette.

Pour les géométries 2 et 3, l'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la déformation totale n'est pas linéaire.

Les Tableaux 4.12 à 4.14 montrent les résultats de l'analyse ANOVA. Quand la valeur p est inférieure à 5 %, l'effet est significatif. Pour la géométrie 1, la pression de maintien, la vitesse d'injection et la combinaison de ces paramètres jouent un rôle significatif sur la déformation. Mais leur influence n'est pas significative pour la géométrie 3. Pour la géométrie 2, seule la pression a un effet.

Tableau 4.12 - Analyse ANOVA de l'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la déformation des éprouvettes, géométrie 1: épaisseur constante

Effect	Univariate Tests of Significance for Déformation (general.sta) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition Include condition: Résine 1: HIVAL 2420NA and Géométrie=1 and Tm=50				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	2,071831	1	2,071831	1653,381	0,000000
Pm	0,053694	2	0,026847	21,425	0,000001
Vinj	0,047166	2	0,023583	18,820	0,000003
Pm*Vinj	0,024159	4	0,006040	4,820	0,003231

Tableau 4.13 - Analyse ANOVA de l'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la déformation des éprouvettes, géométrie 2 : épaisseur variable et géométrie symétrique

Effect	Univariate Tests of Significance for Déformation (general.sta) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition Include condition: Résine 1: HIVAL 2420NA and Géométrie=2 and Tm=50				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	6,583075	1	6,583075	364,8333	0,000000
Pm	0,240862	2	0,120431	6,6743	0,003424
Vinj	0,023498	2	0,011749	0,6511	0,527488
Pm*Vinj	0,157602	4	0,039401	2,1836	0,090474

Tableau 4.14 - Analyse ANOVA de l'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la déformation des éprouvettes, géométrie 3 : épaisseur variable et géométrie asymétrique

Effect	Univariate Tests of Significance for Déformation (general.sta) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition Include condition: Résine 1: HIVAL 2420NA and Géométrie=3 and Tm=50				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	11,99824	1	11,99824	1826,933	0,000000
Pm	0,03034	2	0,01517	2,310	0,113823
Vinj	0,00435	2	0,00217	0,331	0,720288
Pm*Vinj	0,02041	4	0,00510	0,777	0,547505

2) Effet de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la torsion des éprouvettes

L'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la torsion des éprouvettes est montrée aux Figures 4.8 à 4.10. Les valeurs moyennes des angles de torsion sont montrées aux Tableaux A3 à A5 de l'Annexe 3.

Pour la géométrie 1, au centre des éprouvettes dans le sens transversal (ligne I), à pression élevée et modérée, les torsions augmentent avec l'augmentation de la vitesse

d'injection. À faible pression, l'influence de la vitesse n'est pas évidente. À vitesse d'injection élevée et modérée, l'influence de la pression de maintien est presque nulle; à faible vitesse, la torsion diminue avec l'augmentation de la pression. Pour le côté éloigné du seuil (ligne A), il n'y a pas d'influence de la pression et de la vitesse.

Pour la géométrie 2, quand la vitesse reste constante, les torsions diminuent avec l'augmentation de la pression. Quand la pression reste constante, l'influence de la vitesse n'est pas linéaire. Pour la géométrie 3, l'influence de la pression et de la vitesse ne démontre pas de tendance particulière.

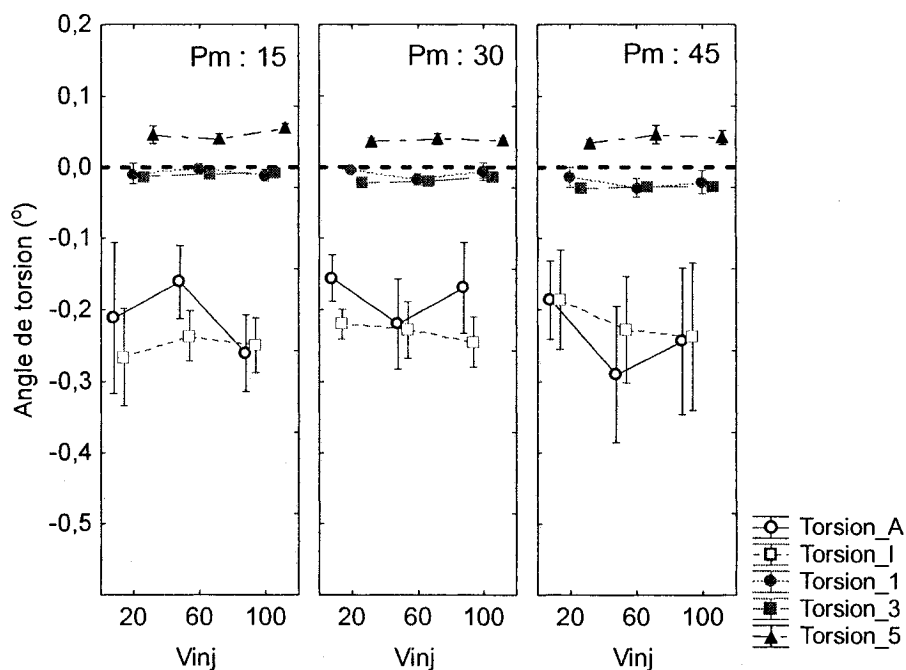


Figure 4.8 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la torsion de l'éprouvette, géométrie 1 : épaisseur constante, résine HIVAL 2420NA, à 50°C.

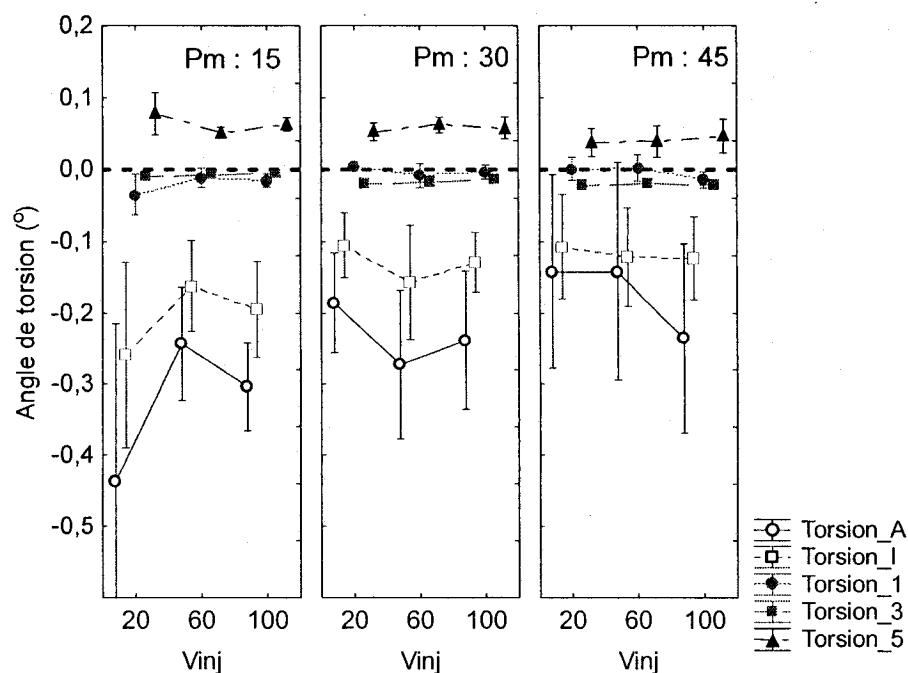


Figure 4.9 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la distorsion de l'éprouvette, géométrie 2 : épaisseur variable et géométrie symétrique, résine HIVAL 2420NA, à 50°C.

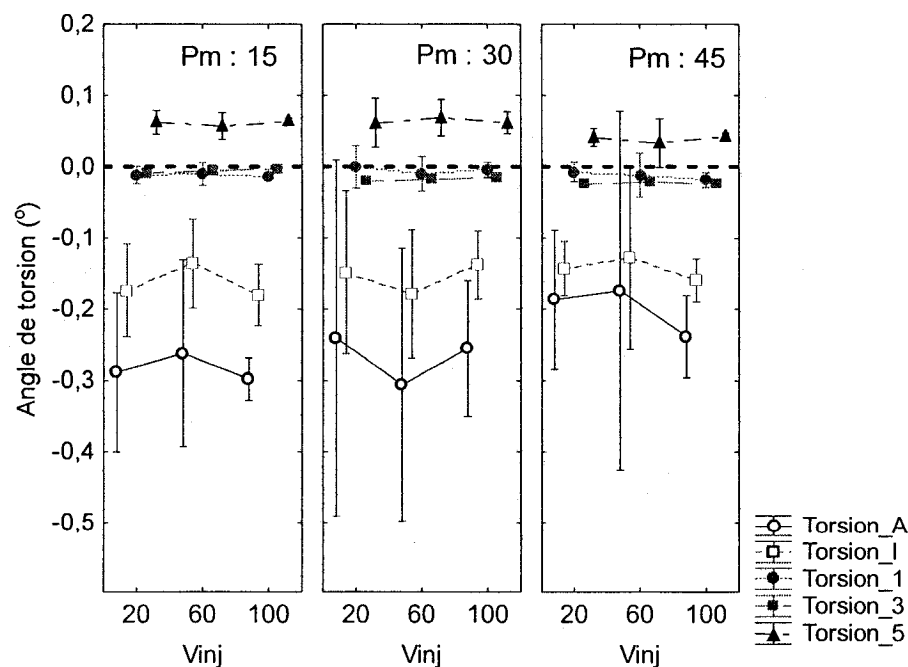


Figure 4.10 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la distorsion de l'éprouvette, géométrie 3 : épaisseur variable et géométrie asymétrique, résine HIVAL 2420NA, à 50°C.

Pour les trois géométries, les angles de torsion et leurs variances dans le sens de l'écoulement sont plus petits que ceux dans le sens transversal. Dans le sens de l'écoulement, les angles de torsion de la colonne 3 augmentent en fonction de la pression de maintien. Les angles de torsion de la colonne 5 sont toujours positifs. Cela montre que le point éloigné du seuil sur la colonne 5 est plus bas que le plan de référence. Dans le sens transversal, tous les angles de torsion sont toujours négatifs. Cela montre que le côté de l'éprouvette le plus près du centre du moule est plus haut que l'autre côté.

3) Effet de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la flexion des éprouvettes

L'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la flexion des éprouvettes est montrée aux Figures 4.11 à 4.13 (résine 1 : HIVAL 2420NA). Les valeurs moyennes des flexions sont montrées aux Tableaux A3 à A5 de l'Annexe 3.

Pour la géométrie 1, dans le sens de l'écoulement, l'influence de la pression et de la vitesse n'est pas linéaire. Dans le sens transversal, les flexions sur les lignes A et I sont plus petites que celles de la ligne Q. Cela dénote que lorsqu'on est plus près du seuil d'injection, les éprouvettes fléchissent toujours vers le bas et déforment davantage qu'au point le plus éloigné du seuil. Quand la vitesse d'injection reste constante, l'augmentation de la pression de maintien diminue légèrement les flexions au plus éloigné du seuil, sur les lignes A et I, mais développe celles de la ligne Q.

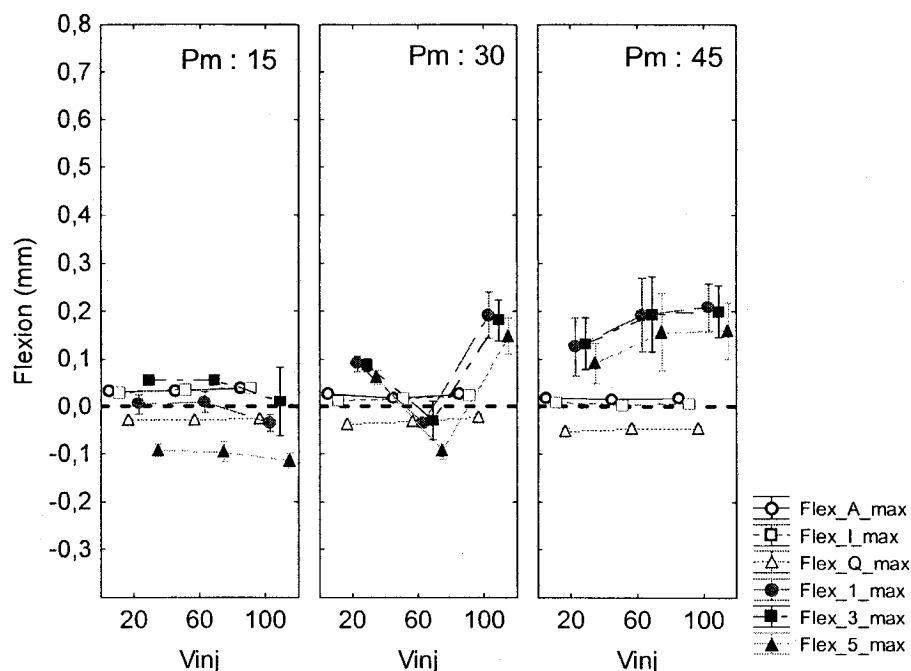


Figure 4.11 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la flexion de l'éprouvette, épaisseur constante (géométrie 1), résine HIVAL 2420NA, à 50°C.

Pour la géométrie 2, les éprouvettes bombent toujours vers le haut dans le sens de l'écoulement. L'influence de la pression et de la vitesse n'est pas linéaire. Une faible pression (15 MPa) donne davantage de flexion aux éprouvettes. Ceci peut être causé par un manque de matière dans les éprouvettes parce que, quand le centre est mince, cette région se solidifie plus rapidement que les deux extrémités. À faible pression de maintien, moins de résine que nécessaire est poussée dans la cavité avant que cette région soit solidifiée. Dans le sens transversal, le centre des éprouvettes fléchit moins et les valeurs sont autour de 0 mm. Ceci peut être expliqué par la solidification rapide de cette région. Au plus éloigné du seuil (ligne A), les éprouvettes fléchissent vers le haut. Par contre, près du seuil (ligne Q), les éprouvettes fléchissent vers le bas et les flexions sur cette ligne augmentent en fonction de la pression de maintien.

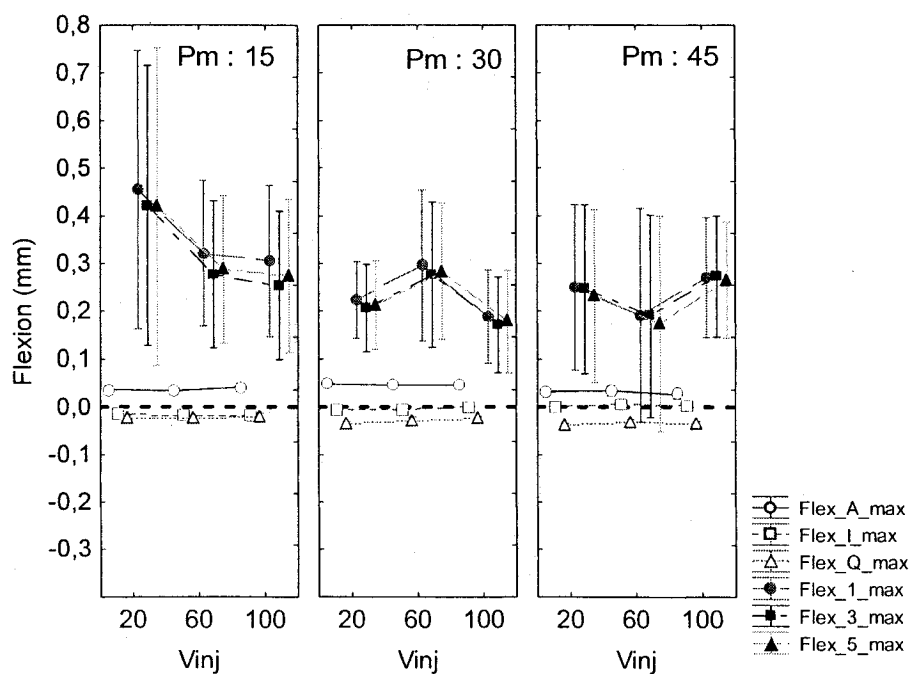


Figure 4.12 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la flexion de l'éprouvette, épaisseur variable et géométrie symétrique (géométrie 2), résine HIVAL 2420NA, à 50°C.

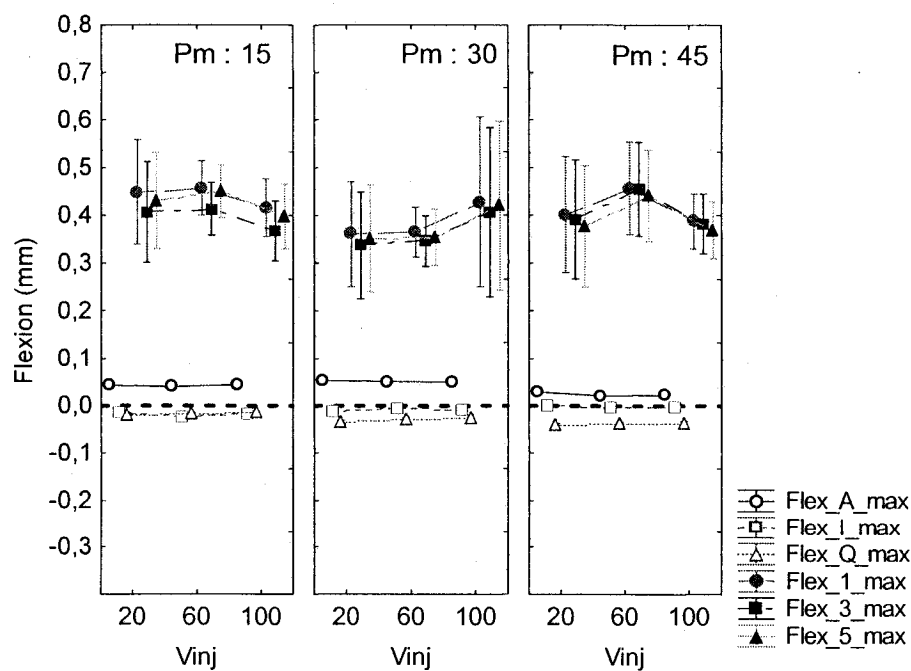


Figure 4.13 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la flexion de l'éprouvette, épaisseur variable et géométrie asymétrique (géométrie 3), résine HIVAL 2420NA, à 50°C.

Pour la géométrie 3, les résultats sont semblables à la géométrie 2, mais les magnitudes des flexions sont de 0.1 mm plus grandes que cette dernière.

En général, pour les trois géométries, les flexions et leurs variances dans le sens de l'écoulement sont plus grandes que celles dans le sens transversal. Les flexions de la géométrie 3 sont les plus grandes des trois géométries. L'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection n'est pas linéaire.

4) Analyse ANOVA des valeurs des angles de torsion et des flexions des éprouvettes en fonction de la pression de maintien et de la vitesse d'injection

Les effets de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur chaque paramètre du gauchissement des éprouvettes sont montrés au Tableau A8 de l'Annexe 5. La température du moule est de 50°C. Les valeurs dans le tableau sont les valeurs de p . Les effets sont significatifs quand p est plus petit que 0,05. Leurs effets sont résumés dans le Tableau 4.15. On voit que la pression de maintien a souvent un effet, mais la vitesse d'injection a rarement un effet sur la torsion et la flexion des éprouvettes.

Tableau 4.15 - Effets de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la torsion et la flexion pour la résine HIVAL 2420NA. //: dans le sens de l'écoulement, +: dans le sens transversal, √: effet significatif, x : effet non significatif.

	Résine 1: HIVAL 2420NA											
	Géométrie 1				Géométrie 2				Géométrie 3			
	Torsion		Flexion		Torsion		Flexion		Torsion		Flexion	
Sens	+	//	+	//	+	//	+	//	+	//	+	//
Pm	√	√	√	√	√	√	√	x	x	x	√	x
Vinj	x	x	√	√	x	x	x	x	x	x	x	x

4.2.2.2 Résine polypropylène Pro-fax SG899

1) Effet de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la déformation des éprouvettes

Pour les éprouvettes, avec épaisseur constante (géométrie 1) et épaisseur variable symétrique (géométrie 2), l'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la déformation totale des éprouvettes est montrée à la Figure 4.14. Les valeurs moyennes des déformations sont montrées au Tableau 4.16.

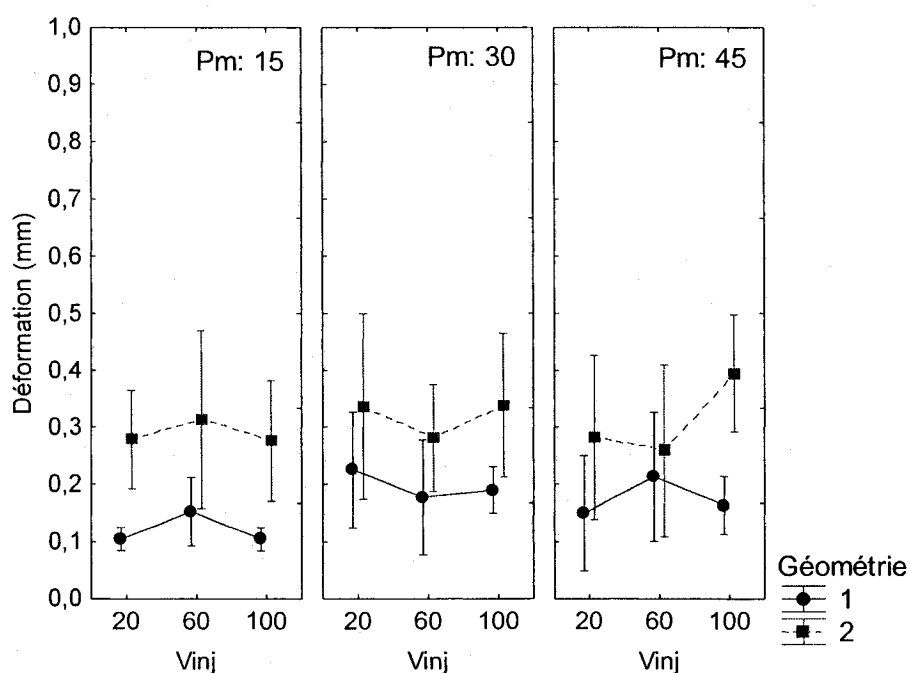


Figure 4.14 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la déformation totale des éprouvettes : géométrie 1 épaisseur constante; géométrie 2 épaisseur variable et géométrie symétrique, résine 2 : Pro-fax SG899, à 50°C.

Les éprouvettes de la géométrie 2 se déforment davantage que celles de la géométrie 1. L'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection n'est pas linéaire. Pour la géométrie 1, une faible pression (15 MPa) est favorable pour diminuer la déformation et sa variance.

Tableau 4.16 - Valeurs moyennes des déformations pour la résine Pro-fax SG899

Géométrie*Pm*Vinj: LS Means Écart_maxima (general.sta) Current effect: F(4, 72)=,76545, p=,55120 Effective hypothesis decomposition Include condition: Résine 2: Pro-fax SG899 and Tm=50							
Cell No.	Géométrie	Pm	Vinj	Mean	-95,00%	95,00%	N
1	1	1	1	0,1052	0,0294	0,1809	5
2	1	1	2	0,1527	0,0769	0,2284	5
3	1	1	3	0,1043	0,0286	0,1801	5
4	1	2	1	0,2252	0,1494	0,3010	5
5	1	2	2	0,1768	0,1011	0,2526	5
6	1	2	3	0,1898	0,1140	0,2655	5
7	1	3	1	0,1490	0,0733	0,2248	5
8	1	3	2	0,2131	0,1373	0,2889	5
9	1	3	3	0,1629	0,0872	0,2387	5
10	2	1	1	0,2784	0,2027	0,3542	5
11	2	1	2	0,3140	0,2383	0,3898	5
12	2	1	3	0,2762	0,2005	0,3520	5
13	2	2	1	0,3364	0,2606	0,4122	5
14	2	2	2	0,2818	0,2060	0,3575	5
15	2	2	3	0,3387	0,2629	0,4145	5
16	2	3	1	0,2824	0,2066	0,3581	5
17	2	3	2	0,2590	0,1832	0,3348	5
18	2	3	3	0,3948	0,3190	0,4705	5

L'analyse ANOVA est montrée aux Tableaux 4.17 et 4.18. Quand la valeur de p est inférieure à 0,05, la variable indépendante a un effet sur la variable dépendante. Seule la pression de maintien a un effet significatif sur la variabilité des valeurs de déformation de la géométrie 1. Ni la pression ni la vitesse d'injection n'a un effet significatif sur celle de la géométrie 2.

Tableau 4.17 - Analyse ANOVA des valeurs des déformations pour la résine Pro-fax SG899, géométrie 1 : épaisseur constante

Univariate Tests of Significance for Déformation (general.sta) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition Include condition: Résine 2: Pro-fax SG899 and Géométrie=1 and Tm=50					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	1,215261	1	1,215261	325,7562	0,000000
Pm	0,046491	2	0,023245	6,2310	0,004745
Vinj	0,006562	2	0,003281	0,8794	0,423747
Pm*Vinj	0,018727	4	0,004682	1,2550	0,305543

Tableau 4.18 - Analyse ANOVA des valeurs des déformations pour la résine Pro-fax SG899, géométrie 2 : épaisseur variable et géométrie symétrique

Effect	Univariate Tests of Significance for Déformation (general.sta) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition Include condition: Résine 2: Pro-fax SG899 and Géométrie=1 and Tm=50				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	4,237255	1	4,237255	395,5479	0,000000
Pm	0,007082	2	0,003541	0,3306	0,720678
Vinj	0,021350	2	0,010675	0,9965	0,379120
Pm*Vinj	0,046219	4	0,011555	1,0786	0,381475

2) Effet de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la torsion des éprouvettes

L'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la torsion des éprouvettes est montrée aux Figures 4.15 et 4.16 et au Tableau 4.19.

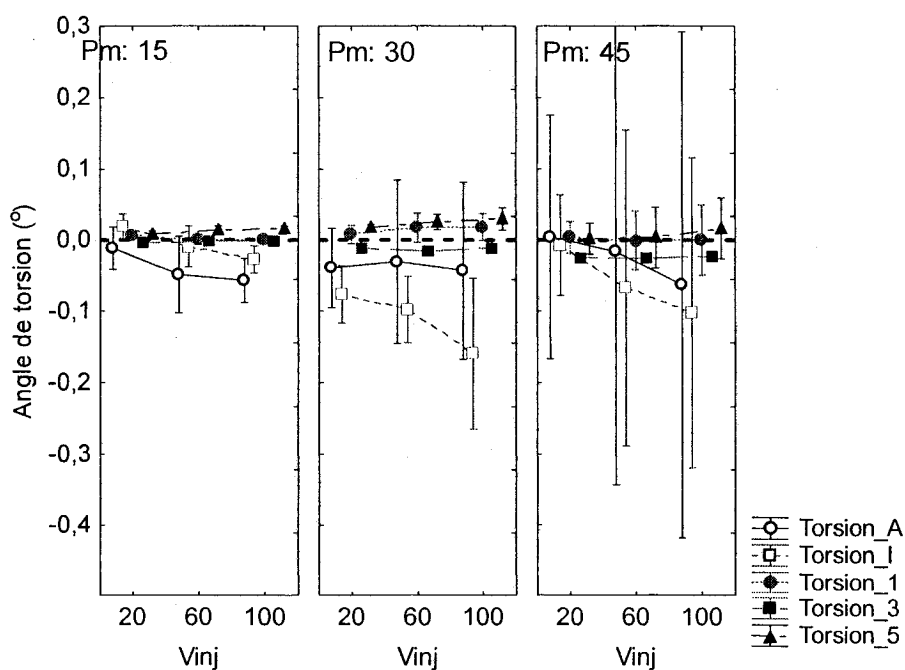


Figure 4.15 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la torsion des éprouvettes, épaisseur constante (géométrie 1), résine 2 :Pro-fax SG899, à 50 °C.

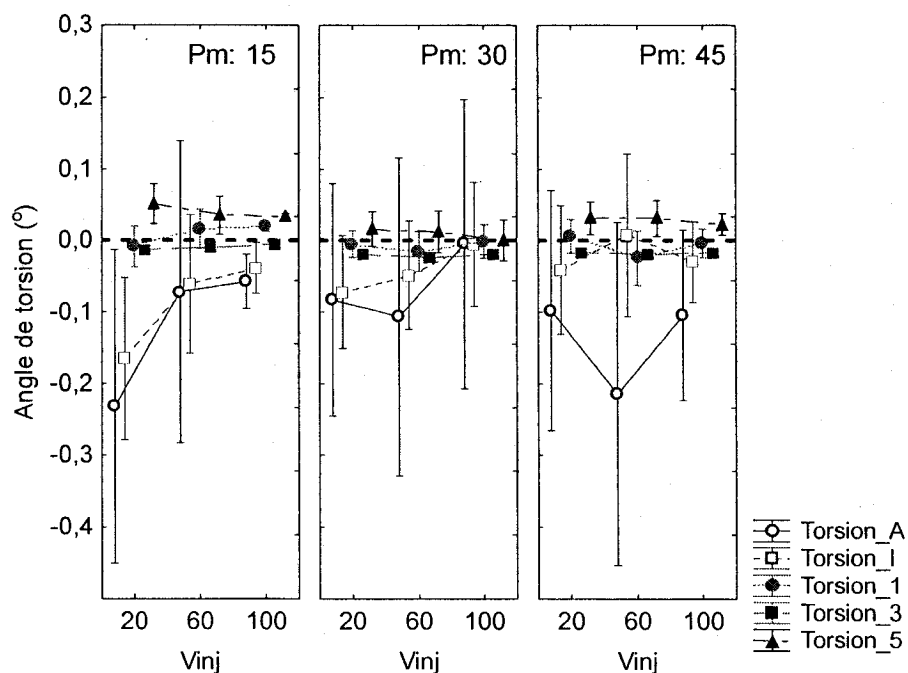


Figure 4.16 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la torsion des éprouvettes, épaisseur variable et géométrie symétrique (géométrie 2), résine 2 : Pro-fax SG899, à 50°C.

Pour les deux géométries (1 et 2), les angles de torsion et leurs variances dans le sens de l'écoulement sont plus petits que ceux dans le sens transversal. Dans le sens de l'écoulement, les angles de torsion de la colonne 5 sont toujours positifs comme pour la résine HIVAL 2420NA (résine 1). Sur la colonne 5, le point le plus éloigné du seuil est toujours plus bas que le plan de référence.

Tableau 4.19 - Valeurs moyennes des torsions de la résine Pro-fax SG899

Géométrie*Pm*Vinj; LS Means (general.sta) Wilks lambda=,53487, F(20, 226,48)=2,3513, p=,00134 Effective hypothesis decomposition Include condition: Résine 2: Pro-fax SG899 and Tm=50									
Cell No.	Géométrie	Pm	Vinj	Torsion_A	Torsion_I	Torsion_1	Torsion_3	Torsion_5	N
1	1	1	1	-0,0117	0,0191	0,0051	-0,0047	0,0081	5
2	1	1	2	-0,0487	-0,0093	0,0006	-0,0022	0,0132	5
3	1	1	3	-0,0567	-0,0277	0,0004	-0,0019	0,0150	5
4	1	2	1	-0,0398	-0,0766	0,0074	-0,0107	0,0177	5
5	1	2	2	-0,0306	-0,0980	0,0170	-0,0148	0,0249	5
6	1	2	3	-0,0431	-0,1597	0,0182	-0,0111	0,0293	5
7	1	3	1	0,0047	-0,0075	0,0033	-0,0245	0,0021	5
8	1	3	2	-0,0166	-0,0668	-0,0009	-0,0248	0,0033	5
9	1	3	3	-0,0632	-0,1019	-0,0001	-0,0242	0,0162	5
10	2	1	1	-0,2315	-0,1653	-0,0085	-0,0134	0,0512	5
11	2	1	2	-0,0716	-0,0608	0,0164	-0,0093	0,0349	5
12	2	1	3	-0,0574	-0,0384	0,0187	-0,0063	0,0335	5
13	2	2	1	-0,0826	-0,0720	-0,0051	-0,0186	0,0162	5
14	2	2	2	-0,1062	-0,0486	-0,0154	-0,0233	0,0121	5
15	2	2	3	-0,0044	-0,0050	-0,0011	-0,0202	0,0001	5
16	2	3	1	-0,0973	-0,0409	0,0058	-0,0173	0,0309	5
17	2	3	2	-0,2140	0,0082	-0,0244	-0,0189	0,0307	5
18	2	3	3	-0,1042	-0,0302	-0,0043	-0,0168	0,0226	5

Dans le sens transversal, les angles de torsion sont presque toujours négatifs. Cela implique que dans ce sens, le côté de l'éprouvette près du centre du moule est plus haut que l'autre côté. Pour la géométrie 1, quand la pression est constante, l'augmentation de la vitesse d'injection augmente la torsion des éprouvettes. Pour la géométrie 2, l'influence n'est pas linéaire.

3) Effet de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la flexion des éprouvettes

L'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la flexion des éprouvettes est montrée aux Figures 4.17 et 4.18 et au Tableau 4.20.

Pour la géométrie 1, dans le sens de l'écoulement, l'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection n'est pas linéaire. Dans le sens transversal, près du seuil d'injection (ligne Q), les flexions augmentent en fonction de la pression de maintien.

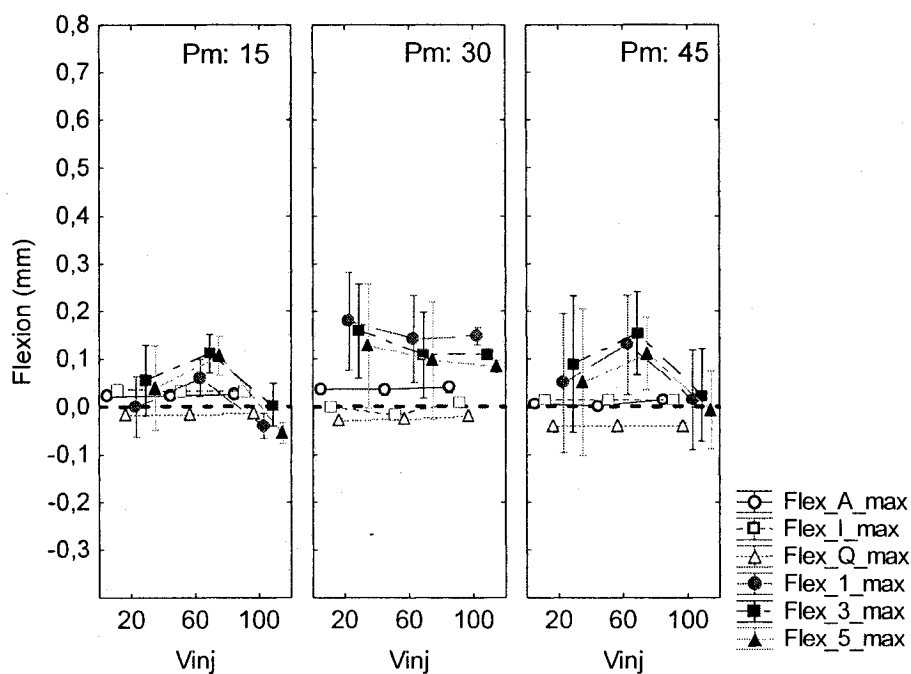


Figure 4.17 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la flexion de l'éprouvette, épaisseur constante (géométrie 1), résine 2 :Pro-fax SG899, à 50°C.

Pour la géométrie 2, l'influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection n'est pas linéaire dans les deux sens de l'écoulement.

Pour les deux géométries, les flexions et leurs variances dans le sens de l'écoulement sont généralement plus grandes que celles dans le sens transversal. Dans le sens transversal, près du seuil d'injection (ligne Q), les éprouvettes fléchissent toujours vers le bas.

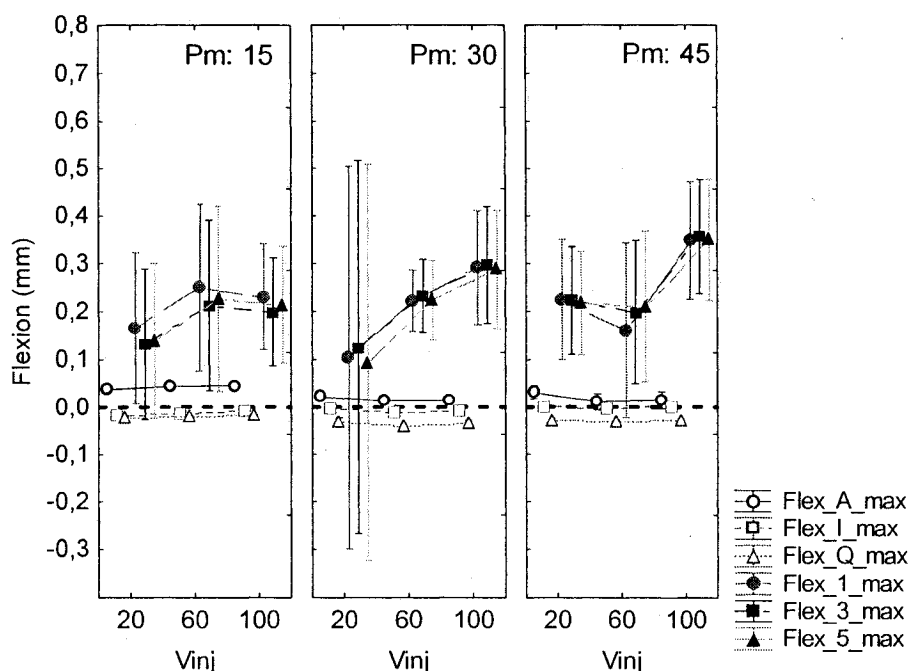


Figure 4.18 - Influence de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la flexion de l'éprouvette, épaisseur variable et géométrie symétrique (géométrie 2), résine 2 :Pro-fax SG899, à 50°C.

Tableau 4.20 - Valeurs moyennes des flexions, résine Pro-fax SG899

Géométrie*Pm*Vinj; LS Means (general.sta) Wilks lambda=,25494, F(24, 234,95)=4,6950, p=,00000 Effective hypothesis decomposition Include condition: Résine 2 : Pro-fax SG899 and Tm=50										
Cell No.	Géométrie	Pm	Vinj	Flex A	Flex I	Flex Q	Flex 1	Flex 3	Flex 5	N
1	1	1	1	0,0228	0,0363	-0,0190	0,0002	0,0553	0,0389	5
2	1	1	2	0,0239	0,0331	-0,0164	0,0604	0,1105	0,1057	5
3	1	1	3	0,0266	0,0324	-0,0160	-0,0403	0,0042	-0,0551	5
4	1	2	1	0,0358	0,0004	-0,0305	0,1785	0,1577	0,1270	5
5	1	2	2	0,0361	-0,0164	-0,0255	0,1418	0,1087	0,0959	5
6	1	2	3	0,0409	0,0081	-0,0191	0,1469	0,1092	0,0828	5
7	1	3	1	0,0046	0,0144	-0,0422	0,0493	0,0896	0,0510	5
8	1	3	2	0,0015	0,0153	-0,0426	0,1298	0,1530	0,1102	5
9	1	3	3	0,0156	0,0136	-0,0416	0,0138	0,0240	-0,0077	5
10	2	1	1	0,0368	-0,0187	-0,0239	0,1650	0,1316	0,1386	5
11	2	1	2	0,0441	-0,0139	-0,0204	0,2496	0,2125	0,2264	5
12	2	1	3	0,0449	-0,0095	-0,0170	0,2304	0,1983	0,2131	5
13	2	2	1	0,0223	-0,0016	-0,0319	0,1027	0,1246	0,0918	5
14	2	2	2	0,0145	-0,0124	-0,0400	0,2213	0,2316	0,2228	5
15	2	2	3	0,0146	-0,0096	-0,0348	0,2916	0,2974	0,2873	5
16	2	3	1	0,0317	0,0007	-0,0297	0,2241	0,2226	0,2168	5
17	2	3	2	0,0118	-0,0025	-0,0326	0,1597	0,1979	0,2099	5
18	2	3	3	0,0154	-0,0001	-0,0289	0,3486	0,3566	0,3496	5

4) Analyse ANOVA des valeurs des angles de torsion et des flexions des éprouvettes en fonction de la pression de maintien et de la vitesse d'injection pour la résine Pro-fax SG899

Les effets de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur chaque paramètre du gauchissement des éprouvettes sont montrés au Tableau A9 de l'Annexe 5. La température du moule est de 50°C. Les valeurs dans le tableau sont les valeurs de p . Les effets sont significatifs quand p est plus petit que 0,05. Leurs effets sont résumés dans le Tableau 4.21. On voit que la pression de maintien a souvent un effet, mais la vitesse d'injection a rarement un effet sur la torsion et la flexion.

Tableau 4.21 - Effets de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur la torsion et la flexion pour la résine Pro-fax SG899. //: dans le sens de l'écoulement, +: dans le sens transversal, √: effet significatif, x : effet non significatif

	Résine 2: Pro-fax SG899							
	Géométrie 1				Géométrie 2			
	Torsion		Flexion		Torsion		Flexion	
Sens	+	//	+	//	+	//	+	//
Pm	x	√	√	√	x	√	√	x
Vinj	x	x	√	√	x	x	x	x

4.2.2.3 Synthèse des effets de la pression de maintien et de la vitesse d'injection

Les effets de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur le gauchissement des éprouvettes (la déformation, la torsion et la flexion) ne sont pas évidents. Les combinaisons qui produisent le moins de gauchissement aux éprouvettes sont résumées au Tableau 4.22 pour chaque résine et géométrie d'éprouvette.

Tableau 4.22 - Conditions qui produisent moins de gauchissement

Éléments du gauchissement	Résine 1 : HIVAL 2420NA						Résine 2 : Pro-fax SG899			
	Géométrie 1		Géométrie 2		Géométrie 3		Géométrie 1		Géométrie 2	
	Pm	Vinj	Pm	Vinj	Pm	Vinj	Pm	Vinj	Pm	Vinj
Déformation	30	20	30	100	30	20	15	100	45	60
Torsion I	45	20	30	20	45	60	45	20	30	100
Flexion Q	30	100	15	100	15	100	15	100	15	100
Flexion 3	30	20	30	100	30	20	15	100	30	20

4.3 Corrélations entre les paramètres du gauchissement

Les corrélations entre les paramètres du gauchissement sont montrées au Tableau A2 de l'Annexe 2. Quand la valeur p est inférieure à 5 %, la corrélation est significative.

Les torsions dans le sens transversal sont reliées avec celles dans le sens de l'écoulement sauf celles au centre de l'éprouvette dans le sens d'écoulement. Ceci implique que les valeurs élevées de torsion dans le sens transversal sont couplées aux valeurs élevées de torsion dans le sens de l'écoulement. La corrélation est positive (0.8605) du côté le plus près du centre du moule et négative (-0.9186) du côté le plus éloigné du centre.

Les valeurs élevées de flexion sur la ligne I sont couplées à de faibles valeurs de flexion dans le sens de l'écoulement. La flexion sur la ligne Q est une déformation locale et n'influence pas les autres flexions.

Les paramètres du gauchissement qui sont relativement indépendants sont indiqués dans le Tableau 4-23 (Flex_Q_max peut être remplacé par Torsion_3). Dans ce tableau, toutes les valeurs de p sont supérieures à 5 %, donc leurs corrélations ne sont pas significatives. En fait, pour simplifier l'analyse, la torsion I et les flexions Q et 3 sont suffisantes pour présenter clairement le gauchissement d'une éprouvette. Aucun couplage n'existe entre ces 3 paramètres.

Tableau 4.23 - Paramètres non corrélés – les éléments essentiels

Variable	Correlations (general.sta) Marked correlations are significant at $p < ,05000$ N=250 (Casewise deletion of missing data)		
	Torsion_I	Flex_Q_max	Flex_3_max
Torsion_I	1,0000	,0896	-,0598
	p= ---	p=,158	p=,346
Flex_Q_max	,0896	1,0000	-,0270
	p=,158	p= ---	p=,671
Flex_3_max	-,0598	-,0270	1,0000
	p=,346	p=,671	p= ---

4.4 Contrôle de qualité

Le contrôle de qualité sert à savoir si la variation des paramètres de mise en œuvre génère des points à l'extérieur des limites de contrôle. Deux paramètres de gauchissement ont été choisis parmi les trois essentiels : l'angle de torsion sur la ligne I (Torsion_I) et la flexion maximale sur la colonne 3 (Flex_3_max) parce que ces deux éléments sont les plus descriptifs du gauchissement. Les diagrammes sont montrés à l'Annexe 6. Les éprouvettes moulées avec la résine 1 (HIVAL 2420NA) et la géométrie 3 (épaisseur constante et géométrie asymétrique) donnent le meilleur résultat parce qu'avec tous les paramètres de mise en œuvre, les qualités des éprouvettes sont toujours contrôlées.

4.5 Synthèse des effets

4.5.1 Régression

Une régression a été effectuée pour les trois éléments essentiels (variables dépendantes) en fonction des paramètres de fabrication (variables indépendantes). Différents modèles sont obtenus pour chaque élément.

$$\text{Torsion}_I = \beta_0 + \beta_1*v1 + \beta_2*v2 + \beta_3*v3 + \beta_4*v4 \quad (4.1)$$

$$\text{Flexion}_Q = \beta_0 + \beta_1*v1 + \beta_2*v2 + \beta_4*v4 + \beta_5*v5 \quad (4.2)$$

$$\text{Flexion}_3 = \beta_2*v2 + \beta_3*v3 \quad (4.3)$$

Dans les équations précédentes, chaque variable est décrite comme suit :

- β_0 : coefficient de l'effet principal;
- β_i : coefficient;
- $v1$: type de résine, Résine;
- $v2$: type de géométrie, Géo;
- $v3$: température du moule, T_m ;
- $v4$: pression de maintien, P_m ;
- $v5$: vitesse d'injection, V_{inj} .

Les coefficients β_0 et β_i et leurs probabilités sont montrés au Tableau 4.24. Pour toutes les variables, si leurs valeurs de p sont inférieures au seuil de probabilité 5 %, leur effet est significatif.

Tableau 4.24 - Synthèse des effets

Coefficient	Torsion I		Flexion Q		Flexion 3	
	Estimateur	p	Estimateur	p	Estimateur	p
β_0	-0,499493	0,000000	-0,024295	0,000000	0,116857	0,058645
β_1	0,143211	0,000000	0,003270	0,000088	-0,015873	0,301584
β_2	0,036959	0,000000	0,002533	0,000004	0,137537	0,000000
β_3	0,038166	0,014968	-0,000788	0,533772	-0,088971	0,000212
β_4	0,015636	0,010113	-0,009132	0,000000	0,017733	0,054106
β_5	-0,002254	0,708961	0,002415	0,000002	0,005672	0,536493

Pour les trois éléments essentiels, la géométrie joue un rôle très important parce que son effet significatif est toujours 0. L'effet de la géométrie est toujours positif. Ceci implique que le changement d'épaisseur des éprouvettes augmente la torsion et la flexion des éprouvettes.

Pour la torsion I, le type de résine, la température du moule et la pression de maintien ont des effets significatifs. Leurs rôles sont semblables. La vitesse d'injection n'en a pas. L'augmentation de l'indice de fluidité, de la température et de la pression de maintien augmente la valeur de la torsion dans le sens transversal à l'écoulement.

Pour la flexion près du seuil, sur la ligne Q, le type de résine, la pression de maintien et la vitesse ont un effet significatif. L'augmentation de la pression fait augmenter la flexion vers le bas sur la ligne Q. Mais l'augmentation de la vitesse d'injection fait augmenter la flexion vers le haut. La température du moule est moins importante pour la flexion sur la ligne Q parce que cette position est très proche du seuil d'injection et la résine à cet endroit est moins influencée par la température du moule qu'aux autres endroits de la cavité.

Pour la flexion au centre de l'éprouvette dans le sens de l'écoulement, sur la colonne 3, l'effet de la température du moule est important. Le type de résine, la pression de maintien et la vitesse d'injection n'a pas d'effet significatif. Après avoir analysé les résultats de l'annexe 5 sur les effets de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur le gauchissement, on note que cette influence est restreinte à la géométrie de l'éprouvette. Pour la géométrie 1, l'influence de la pression et de la vitesse est significative, mais pour les géométries 2 et 3, l'influence n'est pas significative.

4.5.2 Analyse des résidus

Les graphiques de droite de Henry des résidus pour chaque modèle ne montrent pas d'anomalies importantes, voir Figures 4.19 à 4.21. Il n'y a pas de données aberrantes pour les trois éléments essentiels, donc les modèles sont considérés bons.

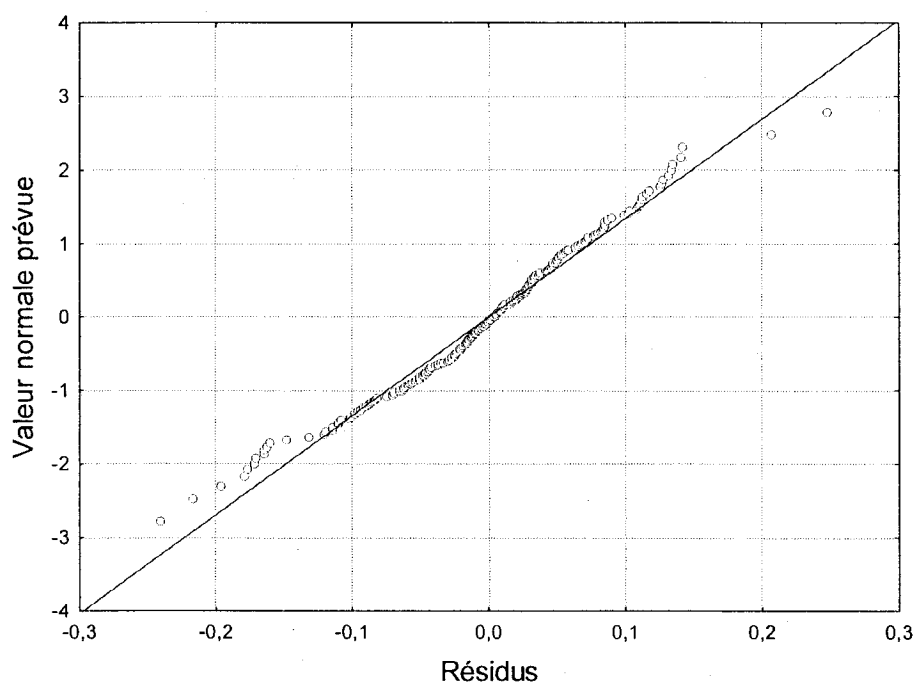


Figure 4.19 – Droite de Henry des résidus du modèle pour la Torsion I.

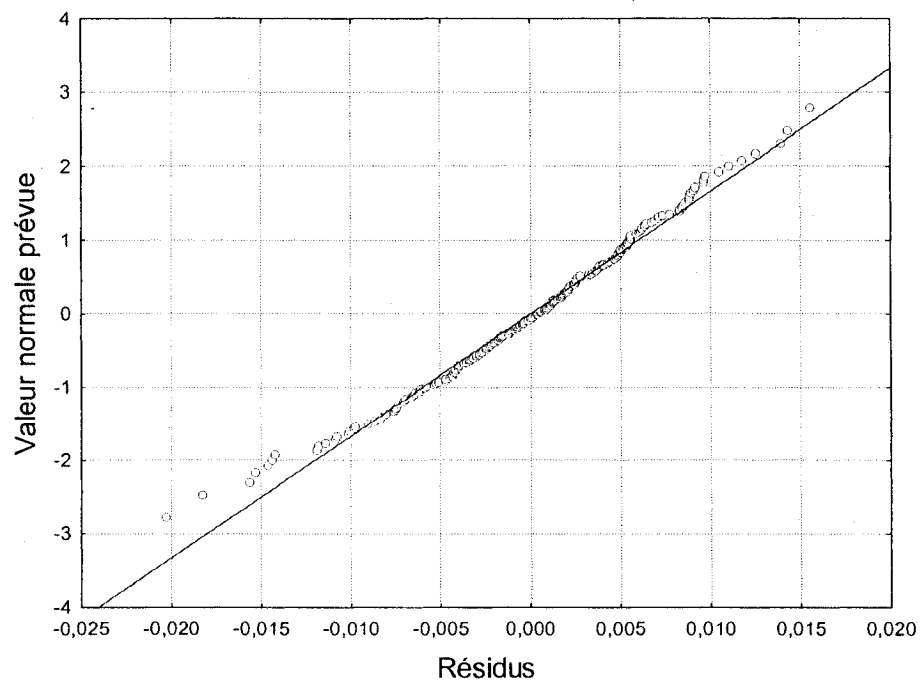


Figure 4.20 - Droite de Henry des résidus du modèle pour la Flexion Q.

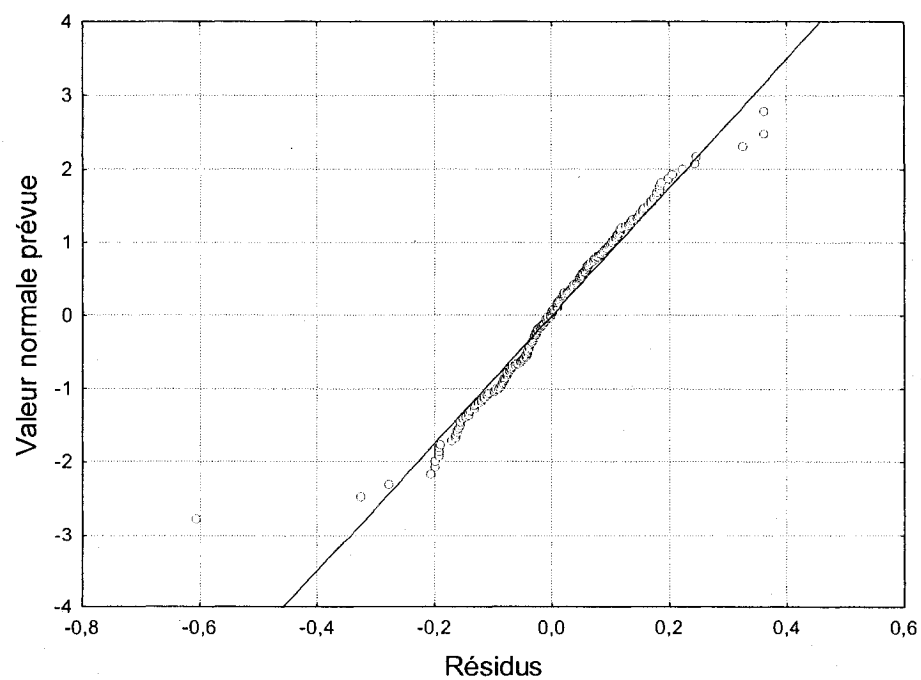


Figure 4.21 - Droite de Henry des résidus du modèle pour la Flexion 3.

5 CONCLUSION

L'objet est une plaque de $114,3 \times 38,1 \times 3$ mm moulée par injection. Son épaisseur et sa configuration au centre peuvent être variables. Trois configurations sont choisies, ce sont : une géométrie à épaisseur constante, une géométrie symétrique à épaisseur variable et une géométrie asymétrique à épaisseur variable.

Les éprouvettes sont moulées en polypropylène dans une cavité munie d'un seuil d'injection en film. Elles sont relativement légères et souples. Si on veut mesurer ces éprouvettes par une technique avec contact alors même une faible force de contact peut engendrer des déformations de l'éprouvette. Alors, la méthode de mesure conventionnelle ne peut servir à mesurer ces éprouvettes. Dans cette étude, un bain de plâtre maintient les éprouvettes dans leur forme originale afin d'éviter toute déformation supplémentaire lors des mesures. L'appareil utilisé pour les mesures de gauchissement est une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT). Le système de mesure s'est avéré être suffisamment précis et exact à l'aide du logiciel STATISTICA.

Le gauchissement de l'éprouvette est calculé à l'aide du logiciel MATLAB (R2006B) à partir des coordonnées des points localisés sur les surfaces de la cavité et des éprouvettes moulées. La vue générale montre globalement l'ondulation de l'éprouvette et sa déformation. Pour présenter la flexion et la torsion de l'éprouvette, trois lignes et trois colonnes sont choisies. Les valeurs de la flexion et de la torsion de l'éprouvette sont montrées dans deux sens : le sens de l'écoulement et le sens transversal à l'écoulement. Il y a donc au total 12 éléments qui présentent le gauchissement de l'éprouvette.

En analysant les éléments de gauchissement, on trouve que trois sont complètement indépendants. Ce sont la torsion au centre de l'éprouvette dans le sens transversal (angle

de torsion de la ligne I), la flexion près du seuil dans le sens transversal à l'écoulement (flexion sur la ligne Q) et la flexion au centre de l'éprouvette dans le sens de l'écoulement (flexion sur la colonne 3). Ces éléments essentiels sont suffisants pour présenter le gauchissement d'une éprouvette. Pour chaque élément essentiel, une régression est faite et une relation est établie entre ces éléments et le type de résine, le type de géométrie de l'éprouvette et les conditions de fabrication.

Les effets des paramètres de fabrication sur le gauchissement sont analysés. Premièrement, on analyse l'effet de la résine et de la géométrie. Les résultats montrent que la résine avec un indice de fluidité élevé engendre moins de gauchissement de l'éprouvette dans les deux sens. Un changement de configuration géométrique de l'éprouvette au niveau de l'épaisseur augmente le gauchissement de l'éprouvette. Une géométrie asymétrique augmente seulement la déformation globale de l'éprouvette.

Deuxièmement, l'effet de la température du moule est analysé. Une température élevée diminue la déformation et la flexion de l'éprouvette.

Troisièmement, l'effet de la pression de maintien et la vitesse d'injection sont analysés à une température du moule constante. Il n'y a pas de tendances prédominantes qui ont pu être observées à partir des résultats obtenus.

De façon générale, les éprouvettes se tordent moins mais fléchissent davantage dans le sens de l'écoulement. Les auteurs Tang, Kong et al. (2006) confirment qu'un refroidissement inégal dans différentes régions du moule contribue au gauchissement des éprouvettes. Dans le sens transversal, les plus grandes flexions ont lieu près du seuil d'injection. Un phénomène semblable est constaté par Zhong & Li (2005), confirmant que les contraintes résiduelles sont plus importantes près du seuil.

RÉFÉRENCES

- ASSOCIATION CANADIENNE DE L'INDUSTRIE DES PLASTIQUES (2005) "<http://www.plastics.ca> (Page consultée le 24 octobre 2006)".
- CHEN, C.-S., CHENG, W.-S., WANG, T.-S., CHIEN, R.-D. (2005). "Optimum design of gas-assisted injection molding". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 24:15. 1577-1586.
- DENIZART, O., VINCENT, M., AGASSANT, J.F. (1995). "Thermal stresses and strains in injection moulding: experiments and computations". *Journal of Materials Science*. 30:2. 552-560.
- EDWARD A., MUCCIO (1991) Plastic Part Technology, ASM international (p.150).
- FISCHER, J.M. (2003). Handbook of Molded Part Shrinkage and Warpage, "<http://www.knovel.com/knovel2/Toc.jsp?BookID=823>"
- HAN, S.-Y., KWAG, J.-K., KIM, C.-J., PARK, T.-W., JEONG, Y.-D. (2004). "A new process of gas-assisted injection molding for faster cooling". *Proceedings of the International Conference on Advances: Journal of Materials Processing Technology*. 155-156:1-3. 1201-1206.
- HUANG, M.-C., TAI, C.-C. (2001). "Effective factors in the warpage problem of an injection-molded part with a thin shell feature". *Journal of Materials Processing Technology*. 110:1. 1-9.
- INJECTION MOLDING RESOURCE ORGANISATION (2006) "<http://www.injection-molding-resource.org> (Page consultée le 24 octobre 2006)".
- JANSEN, K.M.B., VAN DIJK, D.J., HUSSELMAN, M.H. (1998). "Effect of processing conditions on shrinkage in injection molding". *Polymer Engineering and Science*. 38:5. 838-846.
- KENNEDY PETER, ZHENG RONG (2002) "High Accuracy Shrinkage and Warpage Prediction for Injection Molding". *Antec 2002 Plastics: Annual Technical Conference (vol.1)*.

- KRAMSCHUSTER, A., CAVITT, R., ERMER, D., CHEN, Z., TURNG, L.-S. (2005). "Quantitative study of shrinkage and warpage behavior for microcellular and conventional injection molding". *Polymer Engineering and Science*. 45:10. 1408-1418.
- KURTARAN, H., OZCELIK, B., ERZURUMLU, T. (2005). "Warpage optimization of a bus ceiling lamp base using neural network model and genetic algorithm". *Journal of Materials Processing Technology*. 169:2. 314-319.
- KWAK, T.S., SUZUKI, T., BAE, W.B., UEHARA, Y., OHMORI, H. (2005). "Application of neural network and computer simulation to improve surface profile of injection molding optic lens". *Journal of Materials Processing Technology*. 170:1-2. 24-31.
- LEO, V., CUVELLIEZ, Ch. (1996). "Effect of the packing parameters, gate geometry, and mold elasticity on the final dimensions of a molded part". *Polymer Engineering and Science*. 36:15. 1961-1971.
- LIAO, S.J., HSIEH, W.H., WANG, J.T., SU, Y.C. (2004). "Shrinkage and warpage prediction of injection-molded thin-wall parts using artificial neural networks". *Polymer Engineering and Science*. 44:11. 2029-2040.
- LIU, C., MANZIONE, L.T. (1996). "Process studies in precision injection molding. I: process parameters and precision". *Polymer Engineering and Science*. 36:1. 1-9.
- MATLAB (R2006b) USER MANUAL (2006). The Math Works Inc.
- MENGES GEORG, MOHREN PAUL (1986) How to Make Injection Molds, Hanser Publishers, (p. 203).
- NI, S. (2002). "Reducing shrinkage and warpage for printer parts by injection molding simulation analysis". *Journal of Injection Molding Technology*. 6:3. 177-186.
- OSTLE BERNARD, TURNER KENNETH V., HICKS CHARLES R., MCEL RATH GAYLE W. (1996). Engineering Statistics The Industrial Experience, Duxbury Press.

- OZCELIK, B., ERZURUMLU, T. (2006). "Comparison of the warpage optimization in the plastic injection molding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm". *Journal of Materials Processing Technology*. 171:3. 437-445.
- POMERLEAU, J., SANSCHAGRIN, B. (2006). "Injection molding shrinkage of PP: Experimental progress". *Polymer Engineering and Science*. 46:9. 1275-1283.
- POMERLEAU JOËL (2004). "Développement d'une technique de mesure du retrait en moulage par injection". *Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal*.
- POSTAWA, P., KOSZKUL, J. (2005). "Change in injection moulded parts shrinkage and weight as a function of processing conditions". *Journal of Materials Processing Technology*. 162-163:SPEC ISS. 109-115.
- QUALITY DIGEST / JANUARY (2002). "CMM Manufacturers Guide <http://www.qualitydigest.com/pdfs> (Page consultée le 28 février 2007)".
- RÉGNIER G., TROTIGNON J.P. (1993). "Local Orthotropic Shrinkage Determination in Injected Moulded Polymer Plates". *Polymer Testing*. vol.12 no.5 ICIST 383-392.
- STATISTICA 7.0 2006 "<http://statsoft.com>".
- TANG, S.H., KONG, Y.M., SAPUAN, S.M., SAMIN, R., SULAIMAN, S. (2006). "Design and thermal analysis of plastic injection mould". *Journal of Materials Processing Technology*. 171:2. 259-267.
- TANG, S.H., TAN, Y.J., SAPUAN, S.M., SULAIMAN, S., ISMAIL, N., SAMIN, R. (2007). "The use of Taguchi method in the design of plastic injection mould for reducing warpage". *Journal of Materials Processing Technology*. 182:1-3. 418-426.
- TERMIUM PLUS (2006)
["http://www.termiumplus.bureaudelatradduction.gc.ca/tpv2Show/termiumplus.html?lang=f2"](http://www.termiumplus.bureaudelatradduction.gc.ca/tpv2Show/termiumplus.html?lang=f2) (Page consultée le 24 octobre 2006)".
- WANG, T.-H., YOUNG, W.-B. (2005). "Study on residual stresses of thin-walled injection molding". *European Polymer Journal*. 41:10. 2511-2517.

- YOUNG, W.-B. (2005). "Effect of process parameters on injection compression molding of pickup lens". *Applied Mathematical Modelling*. 29:10. 955-971.
- ZHONG, G.-J., LI, Z.-M. (2005). "Injection molding-induced morphology of thermoplastic polymer blends". *Polymer Engineering and Science*. 45:12. 1655-1665.
- ZHOU, H., LI, D. (2005). "Residual stress analysis of the post-filling stage in injection moulding". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 25:7-8. 700-704.

Annexe 1 - Analyse de la répétabilité et de la reproductibilité du système de mesure

Les résultats d'analyse de la répétabilité et de la reproductibilité du système de mesure pour chaque paramètre de gauchissement sont résumés au Tableau A1.

Tableau A1 - Analyse de R&R du système de mesure pour chaque paramètre de gauchissement

	Déformation		Torsion A		Torsion I	
	% of R & R	% of Total	% of R & R	% of Total	% of R & R	% of Total
Repeatability	10,4597	0,0125	58,4509	0,2653	32,0473	0,2664
Reproducibility	89,5403	0,1068	41,5491	0,1886	67,9527	0,5648
Part-to-Part		99,8807		99,5462		99,1688
Combined R & R	100,0000	0,1193	100,0000	0,4538	100,0000	0,8312
Total		100,0000		100,0000		100,0000
	Flexion A max		Flexion I max		Flexion Q max	
	% of R & R	% of Total	% of R & R	% of Total	% of R & R	% of Total
Repeatability	69,3632	2,8784	95,8515	2,9510	47,4214	1,1652
Reproducibility	30,6368	1,2714	4,1485	0,1277	52,5786	1,2920
Part-to-Part		95,8502		96,9213		97,5428
Combined R & R	100,0000	4,1498	100,0000	3,0787	100,0000	2,4572
Total		100,0000		100,0000		100,0000
	Torsion 1		Torsion 3		Torsion 5	
	% of R & R	% of Total	% of R & R	% of Total	% of R & R	% of Total
Repeatability	42,2365	0,2755	47,5036	1,1667	100,0000	0,4962
Reproducibility	57,7635	0,3767	52,4964	1,2893	0,0000	0,0000
Part-to-Part		99,3478		97,5440		99,5038
Combined R & R	100,0000	0,6522	100,0000	2,4560	100,0000	0,4962
Total		100,0000		100,0000		100,0000
	Flexion 1 max		Flexion 3 max		Flexion 5 max	
	% of R & R	% of Total	% of R & R	% of Total	% of R & R	% of Total
Repeatability	9,5546	0,0499	40,6931	0,0481	81,9921	0,0072
Reproducibility	90,4454	0,4727	59,3069	0,0701	18,0079	0,0016
Part-to-Part		99,4774		99,8818		99,9913
Combined R & R	100,0000	0,5226	100,0000	0,1182	100,0000	0,0087
Total		100,0000		100,0000		100,0000

Annexe 2 - Corrélations entre les paramètres du gauchissement

Tableau A2 - Corrélations entre les paramètres du gauchissement

Marked correlations are significant at $p < ,05000$ N=250 (Casewise deletion of missing data)						
	Déformation	Torsion_A	Torsion_I	Flex_A_max	Flex_I_max	Flex_Q_max
Déformation	1,0000 p= ---	-,4636 p=,000	-,2291 p=,000	,2255 p=,000	-,6025 p=0,00	,0526 p=,407
Torsion_A	-,4636 p=,000	1,0000 p= ---	,7268 p=0,00	-,2296 p=,000	,2426 p=,000	-,0144 p=,821
Torsion_I	-,2291 p=,000	,7268 p=0,00	1,0000 p= ---	-,1930 p=,002	-,0966 p=,128	,0896 p=,158
Flex_A_max	,2255 p=,000	-,2296 p=,000	-,1930 p=,002	1,0000 p= ---	-,2397 p=,000	,5224 p=,000
Flex_I_max	-,6025 p=0,00	,2426 p=,000	-,0966 p=,128	-,2397 p=,000	1,0000 p= ---	-,0357 p=,575
Flex_Q_max	,0526 p=,407	-,0144 p=,821	,0896 p=,158	,5224 p=,000	-,0357 p=,575	1,0000 p= ---
Torsion_1	-,3304 p=,000	,8605 p=0,00	,5785 p=0,00	,2666 p=,000	,1266 p=,045	,2282 p=,000
Torsion_3	-,0112 p=,860	-,0051 p=,936	,0638 p=,315	,4752 p=,000	,0659 p=,299	,9385 p=0,00
Torsion_5	,4789 p=,000	-,9186 p=0,00	-,7040 p=0,00	,5711 p=0,00	-,2867 p=,000	,2000 p=,001
Flex_1_max	,9124 p=0,00	-,3082 p=,000	-,1010 p=,111	,1773 p=,005	-,6445 p=0,00	,0200 p=,753
Flex_3_max	,8977 p=0,00	-,2904 p=,000	-,0598 p=,346	,0908 p=,152	-,5691 p=0,00	-,0270 p=,671
Flex_5_max	,8888 p=0,00	-,2765 p=,000	,0267 p=,674	,1385 p=,029	-,6587 p=0,00	,0301 p=,636
	Torsion_1	Torsion_3	Torsion_5	Flex_1_max	Flex_3_max	Flex_5_max
Déformation	-,3304 p=,000	-,0112 p=,860	,4789 p=,000	,9124 p=0,00	,8977 p=0,00	,8888 p=0,00
Torsion_A	,8605 p=0,00	-,0051 p=,936	-,9186 p=0,00	-,3082 p=,000	-,2904 p=,000	-,2765 p=,000
Torsion_I	,5785 p=0,00	,0638 p=,315	-,7040 p=0,00	-,1010 p=,111	-,0598 p=,346	,0267 p=,674
Flex_A_max	,2666 p=,000	,4752 p=,000	,5711 p=0,00	,1773 p=,005	,0908 p=,152	,1385 p=,029
Flex_I_max	,1266 p=,045	,0659 p=,299	-,2867 p=,000	-,6445 p=0,00	-,5691 p=0,00	-,6587 p=0,00
Flex_Q_max	,2282 p=,000	,9385 p=0,00	,2000 p=,001	,0200 p=,753	-,0270 p=,671	,0301 p=,636
Torsion_1	1,0000 p= ---	,1892 p=,003	-,5891 p=0,00	-,1973 p=,002	-,2261 p=,000	-,1941 p=,002
Torsion_3	,1892 p=,003	1,0000 p= ---	,1551 p=,014	-,0652 p=,304	-,0991 p=,118	-,0661 p=,298
Torsion_5	-,5891 p=0,00	,1551 p=,014	1,0000 p= ---	,3357 p=,000	,2850 p=,000	,2879 p=,000
Flex_1_max	-,1973 p=,002	-,0652 p=,304	,3357 p=,000	1,0000 p= ---	,9858 p=0,00	,9827 p=0,00
Flex_3_max	-,2261 p=,000	-,0991 p=,118	,2850 p=,000	,9858 p=0,00	1,0000 p= ---	,9798 p=0,00
Flex_5_max	-,1941 p=,002	-,0661 p=,298	,2879 p=,000	,9827 p=0,00	,9798 p=0,00	1,0000 p= ---

Annexe 3 - Valeurs des paramètres de gauchissement pour la résine HIVAL 2420NA

Les valeurs moyennes et écart-types des paramètres de gauchissement des éprouvettes moulées à la température 50°C sont montrées aux Tableaux A3 à A5. Les valeurs en gras signifient que le paramètre du gauchissement a une valeur la plus petite avec cette condition de fabrication.

Tableau A3 - Valeurs moyennes et écart-types des paramètres de gauchissement, géométrie 1

Variable	Descriptive Statistics (general)					
	Include condition: Résine 1: HIVAL 2420NA and Géométrie 1 and Tm=50 °C					
	Pm=15					
	Vini=20		Vini=60		Vini=100	
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
Torsion A	-0,212	0,085	-0,161	0,041	-0,260	0,043
Torsion I	-0,267	0,055	-0,237	0,028	-0,250	0,031
Flex A max	0,032	0,002	0,033	0,003	0,038	0,004
Flex I max	0,031	0,002	0,035	0,002	0,039	0,003
Flex Q max	-0,029	0,003	-0,029	0,002	-0,027	0,003
Torsion 1	-0,009	0,012	-0,001	0,005	-0,011	0,007
Torsion 3	-0,013	0,001	-0,009	0,001	-0,007	0,002
Torsion 5	0,046	0,010	0,040	0,006	0,056	0,005
Flex 1 max	0,005	0,017	0,009	0,018	-0,035	0,015
Flex 3 max	0,055	0,008	0,058	0,008	0,011	0,058
Flex 5 max	-0,093	0,011	-0,096	0,017	-0,114	0,013
Variable	Pm=30					
	Vini=20		Vini=60		Vini=100	
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
Torsion A	-0,156	0,026	-0,220	0,051	-0,169	0,051
Torsion I	-0,220	0,016	-0,228	0,032	-0,245	0,028
Flex A max	0,027	0,002	0,019	0,001	0,026	0,006
Flex I max	0,013	0,002	0,017	0,002	0,024	0,005
Flex Q max	-0,038	0,003	-0,033	0,002	-0,024	0,007
Torsion 1	-0,004	0,003	-0,017	0,007	-0,006	0,010
Torsion 3	-0,022	0,002	-0,019	0,001	-0,014	0,004
Torsion 5	0,036	0,004	0,039	0,007	0,037	0,003
Flex 1 max	0,090	0,013	-0,035	0,008	0,192	0,039
Flex 3 max	0,088	0,011	-0,030	0,033	0,181	0,035
Flex 5 max	0,061	0,012	-0,095	0,013	0,148	0,030
Variable	Pm=45					
	Vini=20		Vini=60		Vini=100	
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
Torsion A	-0,186	0,044	-0,291	0,077	-0,244	0,083
Torsion I	-0,186	0,056	-0,228	0,060	-0,238	0,083
Flex A max	0,019	0,009	0,016	0,005	0,018	0,005
Flex I max	0,009	0,009	0,003	0,005	0,005	0,002
Flex Q max	-0,051	0,005	-0,048	0,007	-0,047	0,004
Torsion 1	-0,014	0,011	-0,029	0,010	-0,021	0,013
Torsion 3	-0,030	0,003	-0,028	0,004	-0,027	0,002
Torsion 5	0,034	0,004	0,046	0,010	0,042	0,008
Flex 1 max	0,126	0,049	0,193	0,062	0,208	0,040
Flex 3 max	0,133	0,044	0,194	0,063	0,200	0,043
Flex 5 max	0,091	0,034	0,157	0,065	0,159	0,048

Tableau A4 - Valeurs moyennes et écart-types des paramètres de gauchissement, géométrie 2

	Descriptive Statistics (general)					
	Include condition: Résine 1: HIVAL 2420NA and Géométrie 2 and Tm=50 °C					
	Pm=15					
	Vinj=20		Vinj=60		Vinj=100	
Variable	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
Torsion A	-0.436	0.178	-0.243	0.064	-0.304	0.050
Torsion I	-0.259	0.105	-0.162	0.051	-0.195	0.054
Flex A max	0.037	0.006	0.034	0.005	0.041	0.007
Flex I max	-0.015	0.005	-0.016	0.006	-0.019	0.008
Flex Q max	-0.022	0.004	-0.024	0.004	-0.020	0.006
Torsion 1	-0.035	0.023	-0.011	0.011	-0.015	0.007
Torsion 3	-0.010	0.003	-0.009	0.003	-0.005	0.004
Torsion 5	0.078	0.024	0.051	0.006	0.063	0.008
Flex 1 max	0.455	0.236	0.322	0.123	0.305	0.128
Flex 3 max	0.422	0.237	0.277	0.124	0.255	0.125
Flex 5 max	0.419	0.268	0.287	0.125	0.273	0.130
	Pm=30					
	Vinj=20		Vinj=60		Vinj=100	
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
Torsion A	-0.186	0.056	-0.273	0.084	-0.238	0.078
Torsion I	-0.105	0.036	-0.157	0.065	-0.129	0.033
Flex A max	0.049	0.005	0.046	0.004	0.047	0.004
Flex I max	-0.005	0.002	-0.006	0.006	0.000	0.003
Flex Q max	-0.034	0.003	-0.029	0.007	-0.023	0.004
Torsion 1	0.004	0.005	-0.008	0.013	-0.004	0.008
Torsion 3	-0.020	0.002	-0.017	0.004	-0.013	0.002
Torsion 5	0.052	0.010	0.062	0.009	0.058	0.012
Flex 1 max	0.223	0.064	0.296	0.127	0.189	0.078
Flex 3 max	0.206	0.074	0.276	0.123	0.171	0.080
Flex 5 max	0.212	0.075	0.284	0.115	0.178	0.086
	Pm=45					
	Vinj=20		Vinj=60		Vinj=100	
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
Torsion A	-0.143	0.109	-0.143	0.123	-0.236	0.107
Torsion I	-0.107	0.058	-0.121	0.056	-0.123	0.046
Flex A max	0.033	0.005	0.035	0.008	0.028	0.008
Flex I max	0.001	0.007	0.007	0.004	0.002	0.005
Flex Q max	-0.038	0.003	-0.033	0.006	-0.036	0.005
Torsion 1	0.001	0.013	0.002	0.015	-0.014	0.009
Torsion 3	-0.022	0.002	-0.019	0.003	-0.021	0.003
Torsion 5	0.038	0.016	0.039	0.018	0.047	0.019
Flex 1 max	0.250	0.140	0.193	0.180	0.271	0.101
Flex 3 max	0.246	0.142	0.191	0.171	0.273	0.102
Flex 5 max	0.232	0.145	0.174	0.182	0.265	0.098

Tableau A5 - Valeurs moyennes et écart-types des paramètres de gauchissement, géométrie 3

	Descriptive Statistics (general) Include condition: Résine 1: HIVAL 2420NA and Géométrie 3 and Tm=50°C					
	Pm=15					
	Vinj=20		Vinj=60		Vinj=100	
Variable	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
Torsion A	-0,289	0,090	-0,262	0,106	-0,298	0,024
Torsion I	-0,174	0,053	-0,136	0,050	-0,180	0,035
Flex A max	0,043	0,003	0,040	0,004	0,044	0,002
Flex I max	-0,015	0,005	-0,024	0,003	-0,019	0,004
Flex Q max	-0,019	0,003	-0,017	0,002	-0,015	0,001
Torsion 1	-0,012	0,010	-0,010	0,013	-0,013	0,003
Torsion 3	-0,009	0,002	-0,006	0,003	-0,003	0,001
Torsion 5	0,062	0,013	0,057	0,015	0,064	0,004
Flex 1 max	0,449	0,088	0,457	0,046	0,416	0,049
Flex 3 max	0,407	0,085	0,413	0,045	0,367	0,051
Flex 5 max	0,431	0,082	0,450	0,045	0,397	0,055
	Pm=30					
	Vinj=20		Vinj=60		Vinj=100	
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
Torsion A	-0,240	0,201	-0,306	0,154	-0,255	0,077
Torsion I	-0,148	0,092	-0,178	0,073	-0,138	0,039
Flex A max	0,053	0,004	0,051	0,003	0,049	0,006
Flex I max	-0,011	0,002	-0,005	0,000	-0,008	0,006
Flex Q max	-0,035	0,003	-0,030	0,003	-0,026	0,006
Torsion 1	0,000	0,024	-0,010	0,019	-0,004	0,008
Torsion 3	-0,020	0,002	-0,017	0,002	-0,015	0,003
Torsion 5	0,062	0,028	0,069	0,020	0,062	0,012
Flex 1 max	0,361	0,088	0,364	0,042	0,428	0,143
Flex 3 max	0,337	0,090	0,346	0,043	0,407	0,142
Flex 5 max	0,351	0,090	0,354	0,047	0,420	0,143
	Pm=45					
	Vinj=20		Vinj=60		Vinj=100	
	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.	Mean	Std.Dev.
Torsion A	-0,187	0,079	-0,174	0,203	-0,238	0,046
Torsion I	-0,143	0,031	-0,127	0,104	-0,160	0,024
Flex A max	0,029	0,005	0,021	0,003	0,022	0,002
Flex I max	0,000	0,005	-0,003	0,003	-0,003	0,003
Flex Q max	-0,042	0,003	-0,037	0,004	-0,039	0,006
Torsion 1	-0,007	0,011	-0,012	0,025	-0,019	0,008
Torsion 3	-0,024	0,002	-0,022	0,002	-0,023	0,003
Torsion 5	0,041	0,010	0,033	0,028	0,043	0,004
Flex 1 max	0,401	0,098	0,457	0,078	0,387	0,046
Flex 3 max	0,392	0,100	0,455	0,080	0,382	0,051
Flex 5 max	0,377	0,102	0,442	0,077	0,369	0,048

Annexe 4 - Effets de la géométrie et de la température du moule sur le gauchissement

L'analyse ANOVA montre les effets de la géométrie et de la température du moule sur le gauchissement des éprouvettes. Les résultats pour chaque paramètre de gauchissement sont montrés au Tableau A6 pour la résine HIVAL 2420NA et au Tableau A7 pour la résine Pro-fax SG899. Les chiffres en gras signifient que leur effet est significatif.

Tableau A6 - Essai de signification de la géométrie et de la température du moule sur chaque paramètre du gauchissement, résine 1 : HIVAL 2420NA

Effect	Univariate Results of Significance for Each DV (general.sta) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition Include condition: Résine 1 : HIVAL 2420NA, Pm=30 MPa, Vinj=60 mm/s					
	Valeur p					
	Déformation	Torsion_A	Torsion_I	Torsion_1	Torsion_3	Torsion_5
Intercept	0,000000	0,000000	0,000000	0,013585	0,000000	0,000000
Géométrie	0,000005	0,072389	0,000275	0,980520	0,318391	0,000262
Tm	0,104159	0,116268	0,183068	0,105430	0,004213	0,133053
Effect	Flex_A_max	Flex_I_max	Flex_Q_max	Flex_1_max	Flex_3_max	Flex_5_max
Intercept	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Géométrie	0,000000	0,000000	0,043306	0,000000	0,000000	0,000000
Tm	0,620353	0,000000	0,017700	0,000414	0,000958	0,001344

Tableau A7 - Essai de signification de la géométrie et de la température du moule sur chaque paramètre du gauchissement, résine 2 : Pro-fax SG899

Effect	Univariate Results of Significance for Each DV (general.sta) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition Include condition: Résine 2: Pro-fax SG899, Pm=30 MPa, Vinj=60 mm/s					
	Valeur p					
	Déformation	Torsion_A	Torsion_I	Torsion_1	Torsion_3	Torsion_5
Intercept	0,000000	0,000228	0,000003	0,017565	0,000000	0,000004
Géométrie	0,118265	0,265460	0,109768	0,000619	0,000000	0,030636
Tm	0,001255	0,063991	0,419047	0,010714	0,001024	0,389531
Effect	Flex_A_max	Flex_I_max	Flex_Q_max	Flex_1_max	Flex_3_max	Flex_5_max
Intercept	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Géométrie	0,000000	0,039736	0,000155	0,050715	0,003831	0,008705
Tm	0,003877	0,666512	0,986038	0,007174	0,005824	0,005539

Annexe 5 - Effets de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur le gauchissement

Les effets de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur le gauchissement des éprouvettes sont montrés aux Tableaux A8 et A9 pour les deux résines. La température du moule est de 50°C. Les valeurs sont les valeurs de p . Les effets sont significatifs quand p est plus petit que 0,05.

Tableau A8 - Effet de la pression de maintien et de la vitesse d'injection sur chaque paramètre du gauchissement pour la résine 1 (HIVAL 2420NA) à la température du moule de 50°C

Univariate Tests of Significance for chaque paramètre de gauchissement Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition Include condition: Résine 1: HIVAL 2420NA and Tm=50°C						
Géométrie 1						
	Degr. of Freedom	Torsion_A	Torsion_I	Torsion_1	Torsion_3	Torsion_5
Intercept	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Pm	2	0,034195	0,163513	0,000316	0,000000	0,001371
Vinj	2	0,122495	0,518856	0,145782	0,000009	0,057550
Pm*Vinj	4	0,017436	0,468764	0,042402	0,180847	0,010006
	Flexion_A	Flexion_I	Flexion_Q	Flexion_1	Flexion_3	Flexion_5
Intercept	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000015
Pm	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Vinj	0,022306	0,003307	0,000507	0,000018	0,001096	0,000001
Pm*Vinj	0,135219	0,005623	0,050614	0,000000	0,000000	0,000000
Géométrie 2						
	Degr. of Freedom	Torsion_A	Torsion_I	Torsion_1	Torsion_3	Torsion_5
Intercept	1	0,000000	0,000000	0,000027	0,000000	0,000000
Pm	2	0,000795	0,000459	0,000486	0,000000	0,000349
Vinj	2	0,508207	0,884736	0,514776	0,001003	0,538048
Pm*Vinj	4	0,024918	0,088361	0,007260	0,196357	0,079039
	Flexion_A	Flexion_I	Flexion_Q	Flexion_1	Flexion_3	Flexion_5
Intercept	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Pm	0,000000	0,000000	0,000000	0,028925	0,126226	0,102759
Vinj	0,897862	0,794924	0,012625	0,549259	0,498336	0,630601
Pm*Vinj	0,142739	0,068748	0,088256	0,348285	0,287758	0,372661
Géométrie 3						
	Degr. of Freedom	Torsion_A	Torsion_I	Torsion_1	Torsion_3	Torsion_5
Intercept	1	0,000000	0,000000	0,000151	0,000000	0,000000
Pm	2	0,165574	0,675616	0,325984	0,000000	0,000457
Vinj	2	0,853447	0,866312	0,611200	0,000090	0,883033
Pm*Vinj	4	0,838374	0,553433	0,833038	0,314480	0,784221
	Flexion_A	Flexion_I	Flexion_Q	Flexion_1	Flexion_3	Flexion_5
Intercept	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Pm	0,000000	0,000000	0,000000	0,183244	0,293771	0,245970
Vinj	0,014559	0,411332	0,001253	0,736566	0,669965	0,623091
Pm*Vinj	0,141613	0,005878	0,440735	0,385290	0,354039	0,345330

Tableau A9 - Effet de la pression de maintien et de la vitesse d'injection pour la résine 2 (Pro-fax SG899) à la température du moule de 50°C

Univariate Tests of Significance for chaque paramètre de gauchissement Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition Include condition: Résine 2: Pro-fax SG899 and Tm=50°C						
	Géométrie 1					
	Degr. of Freedom	Torsion_A	Torsion_I	Torsion_1	Torsion_3	Torsion_5
Intercept	1	0,128598	0,000134	0,067670	0,000000	0,000006
Pm	2	0,958730	0,013000	0,146650	0,000000	0,046522
Vinj	2	0,769881	0,098715	0,992548	0,180161	0,275799
Pm*Vinj	4	0,987919	0,962848	0,885714	0,036612	0,966699
	Flexion_A	Flexion_I	Flexion_Q	Flexion_1	Flexion_3	Flexion_5
Intercept	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000004
Pm	0,000000	0,000000	0,000000	0,000005	0,031222	0,035522
Vinj	0,007213	0,000103	0,001663	0,031358	0,009900	0,003663
Pm*Vinj	0,365761	0,000000	0,016894	0,250113	0,198288	0,255540
	Géométrie 2					
	Degr. of Freedom	Torsion_A	Torsion_I	Torsion_1	Torsion_3	Torsion_5
Intercept	1	0,000025	0,000023	0,515350	0,000000	0,000000
Pm	2	0,378503	0,035121	0,051231	0,000000	0,000521
Vinj	2	0,263147	0,021914	0,265031	0,025883	0,154036
Pm*Vinj	4	0,349889	0,331461	0,062036	0,003964	0,890144
	Flexion_A	Flexion_I	Flexion_Q	Flexion_1	Flexion_3	Flexion_5
Intercept	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Pm	0,000000	0,000001	0,000000	0,761285	0,347383	0,442995
Vinj	0,068372	0,214465	0,040894	0,078508	0,075994	0,068664
Pm*Vinj	0,006385	0,011624	0,049131	0,473866	0,664169	0,724960

Annexe 6 - Contrôle de qualité

Les diagrammes du contrôle de qualité sont montrés aux Figures A1 à A10 pour chaque géométrie et chaque résine.

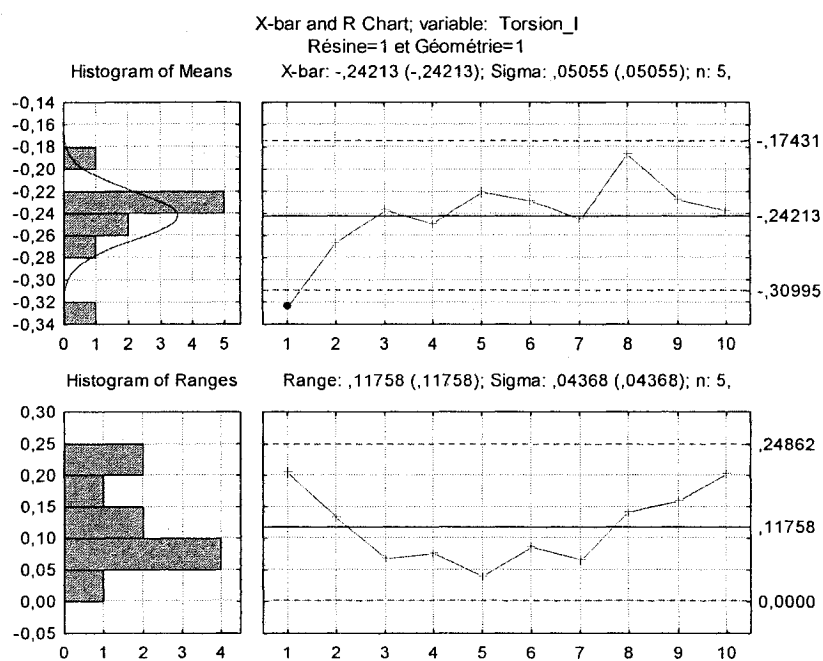


Figure A1 - Torsion dans le sens transversal au centre des éprouvettes, résine 1 et géométrie 1.

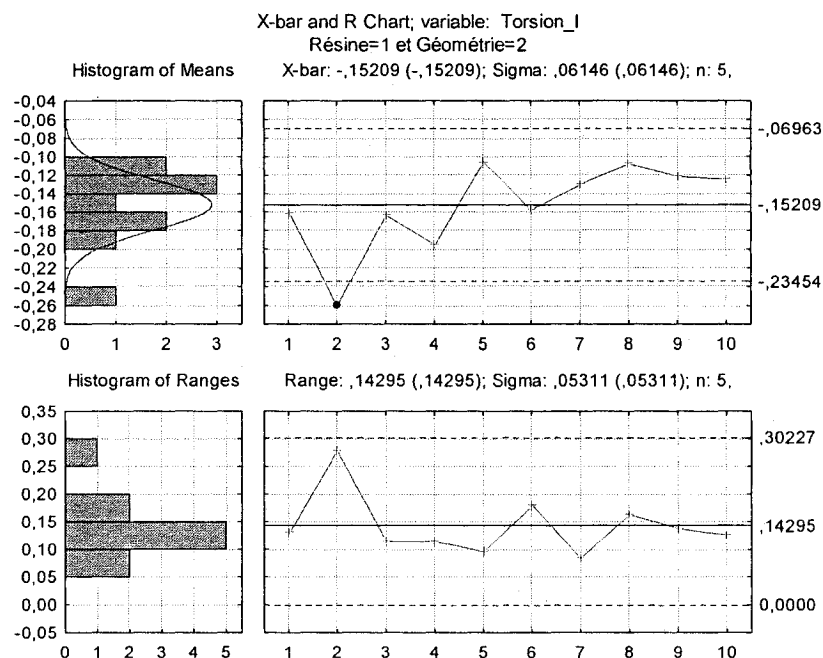


Figure A2 - Torsion dans le sens transversal au centre des éprouvettes, résine 1 et géométrie 2.

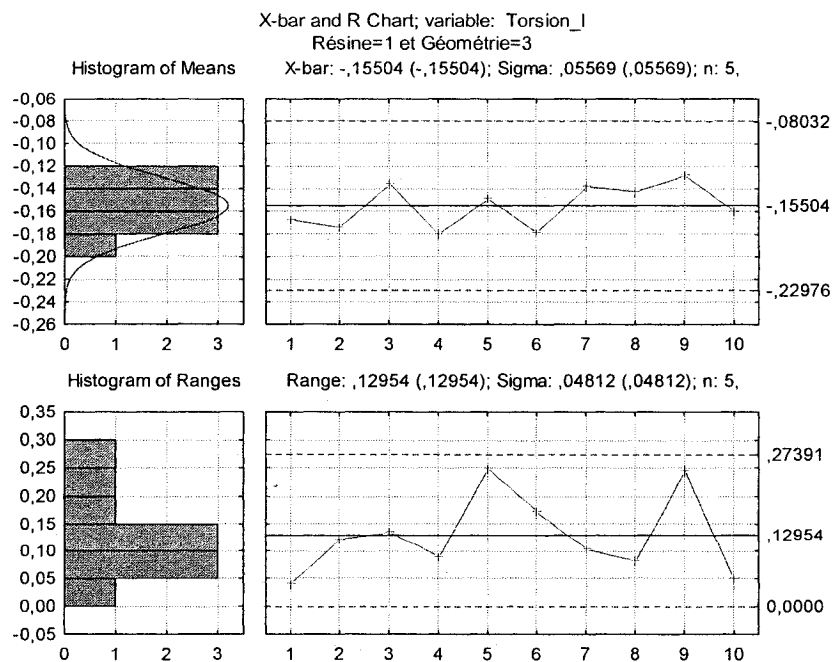


Figure A3 - Torsion dans le sens transversal au centre des éprouvettes, résine 1 et géométrie 3.

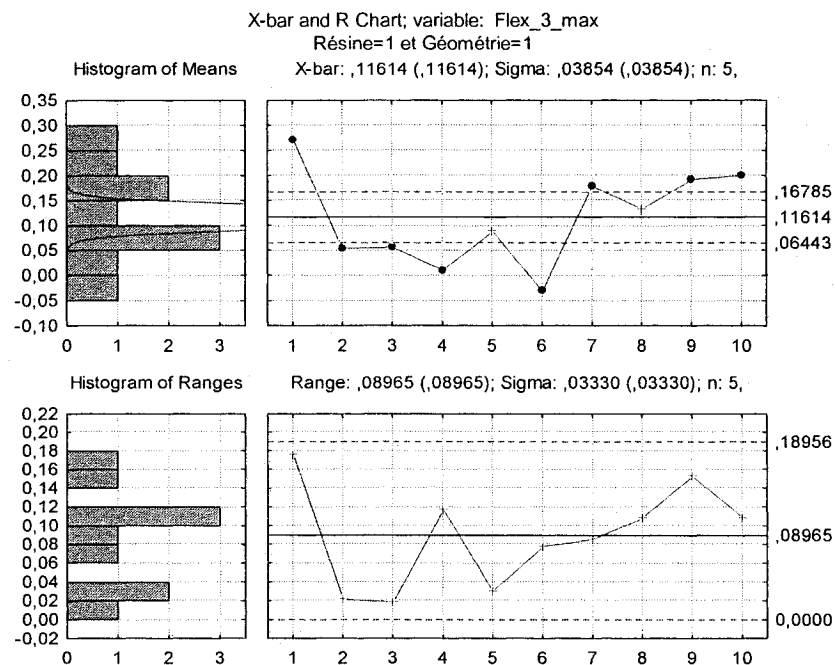


Figure A4 - Flexion dans le sens de l'écoulement au centre des éprouvettes, résine 1 et géométrie 1.

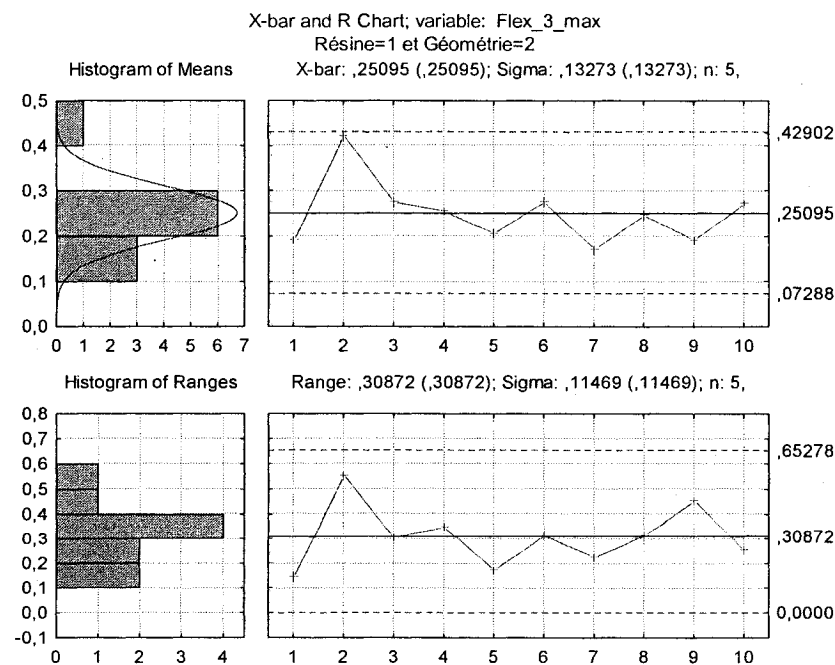


Figure A5 - Flexion dans le sens de l'écoulement au centre des éprouvettes, résine 1 et géométrie 2.

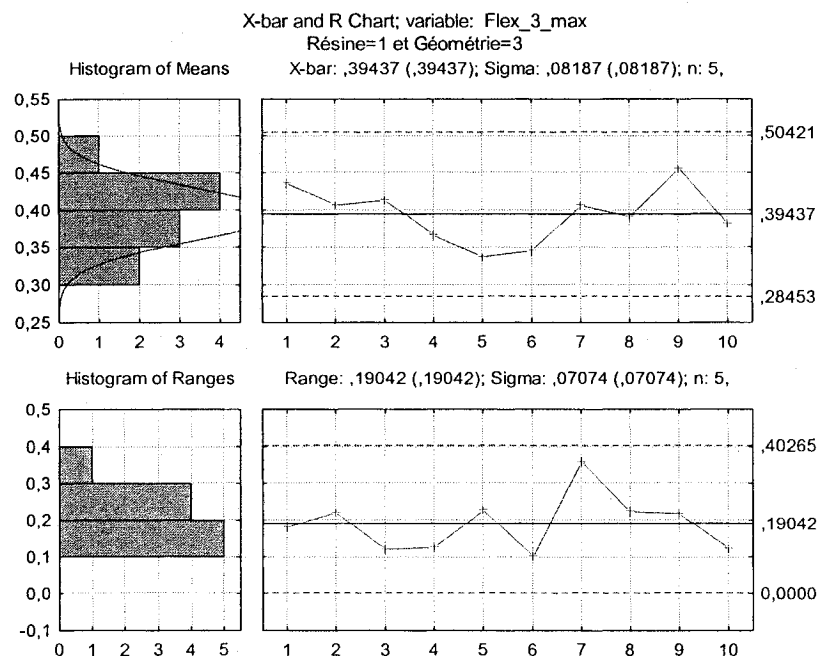


Figure A6 - Flexion dans le sens de l'écoulement au centre des éprouvettes, résine 1 et géométrie 3.

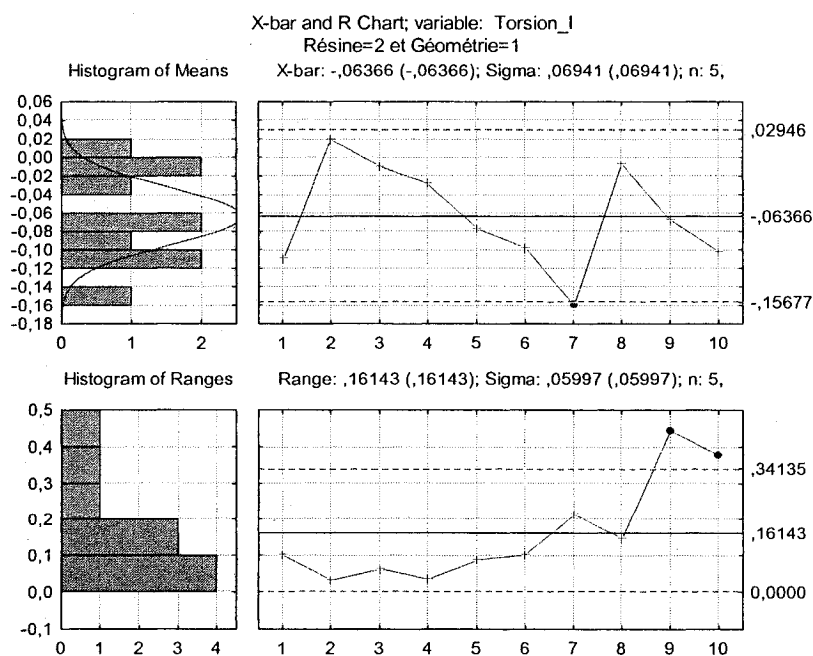


Figure A7 - Torsion dans le sens transversal au centre des éprouvettes, résine 2 et géométrie 1.

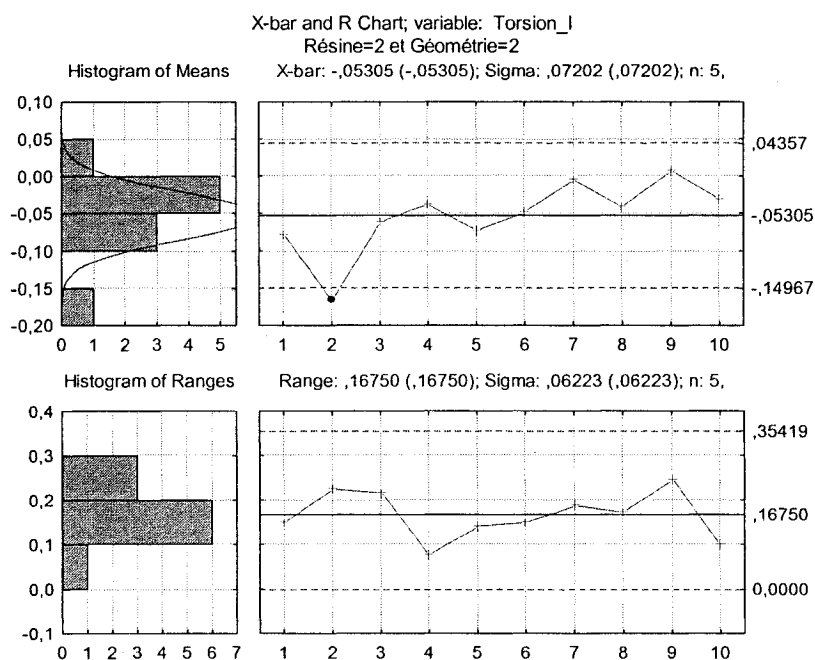


Figure A8 - Torsion dans le sens transversal au centre des éprouvettes, résine 2 et géométrie 2.

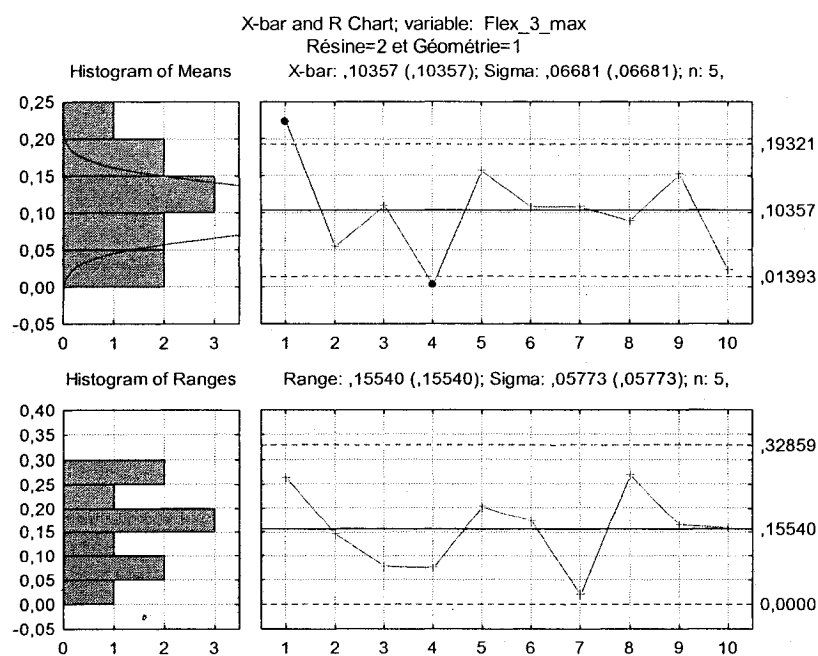


Figure A9 - Flexion dans le sens de l'écoulement au centre des éprouvettes, résine 2 et géométrie 1.

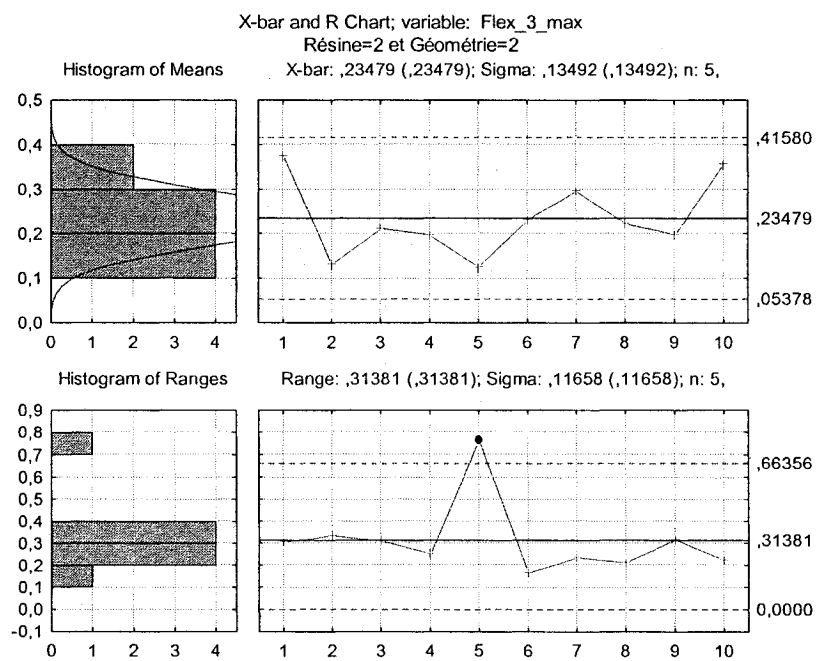


Figure A10 - Flexion dans le sens de l'écoulement au centre des éprouvettes, résine 2 et géométrie 2.